

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá

1991



DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR EM
FERRO SILÍCIO PARA FABRICAÇÃO DE
ÉTER SULFÚRICO.

GERSON ANTONIO ROMANEL

1110000199



DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR EM FERRO SILÍCIO PARA
FABRICAÇÃO DE ÉTER SULFÚRICO

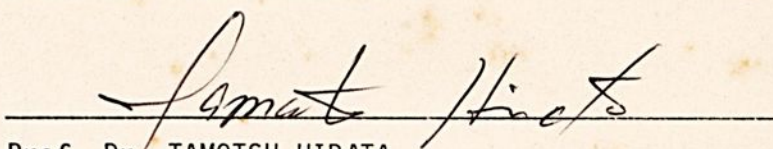
GERSON ANTÔNIO ROMANEL

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE "MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM
PROJETOS E MATERIAIS E, APROVADA EM SUA FORMA
FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

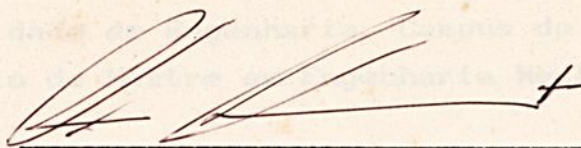


Prof. Dr. NAZEM NASCIMENTO

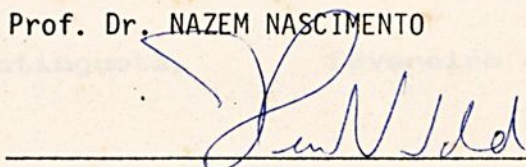


Prof. Dr. TAMOTSU HIRATA

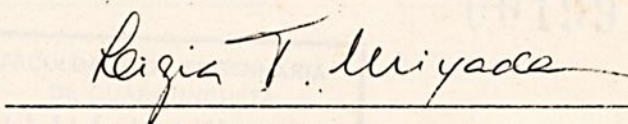
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. NAZEM NASCIMENTO



Prof. Dr. HERMAN JACOBUS CORNELIS VOORWALD



Dra. LIGIA TERUKO MIYADA

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ - FACULDADE DE ENGENHARIA
Departamento de Mecânica

DESENVOLVIMENTO DE UM REATOR EM
FERRO SILÍCIO PARA FABRICAÇÃO DE
ÉTER SULFÚRICO

Trabalho apresentado ao Conselho de Curso da
Área de Concentração de Projetos e Materiais do Curso de
Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá,
para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Guaratinguetá, fevereiro de 1991.

T661.724(043)
R 758 d

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

00199 199



(Agradecimento especial)

À Eliana, Rafael, Cibeles e Elisson

pelo incentivo e resignação.



AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Nazem Nascimento, pela orientação e estímulo recebidos.

Ao Prof. Dr. Herman J. C. Voorwold, pelo apoio e sugestões recebidas.

Ao Sr. Walter Weidlich, pelo apoio e fornecimento de informações sobre o material pesquisado.

Ao Maj. Eng. Qui. José Teófilo de Moraes e Silva Neto, pelo apoio dado à pesquisa e acabamento deste trabalho.

Aos integrantes da Engenharia de Manutenção da Imbel, Piquete, pelo apoio prestado.

À Electro Aço Altona pelo fornecimento de material e informações para o desenvolvimento do trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a execução desta obra.

À Deus por permitir que este acontecesse.



ABSTRACT

This book has the objective to study the alternative material development to be used in the construction of reactors for the sulphuric ether manufacture which must be placed by those ones used today (at nowadays) made up of plumbum alloy, from 1907, date of the project. It has the aim to grow the efficiency and productivity up of the Ether Manufacture Unit Of Presidente Vargas Factory, getting the maintenance cost down and, meanly, plaring the plumbum by material which must not be toxicallogical to human body, in maintenance and manufacture operation as in not adequate aplication of the ether manufactured in plumbum reactors for medical utilities.

On research of the material which has resistance to corrosive action of sulphuric acid at 140°C , 85 % of concentration and ethilic alcohol, one got success whith alloys of cast iron whith high silic content (from 14 % to 15 % of silic); which can be found on nacional market and sold at comercial levels.

It is presented too in the scope of this work, a project of the jacket iron silic reactors in carbon steel.



RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo estudar o desenvolvimento de material alternativo para ser utilizado na construção de reatores para fabricação de éter sulfúrico, em substituição aos utilizados atualmente de ligas de chumbo, cujo projeto data de 1907. Visa, também a aumentar a eficiência e a produtividade da Usina de Fabricação de Éter da Fábrica Presidente Vargas, diminuindo os custos de manutenção e principalmente substituindo o chumbo por material não tóxico ao homem, nas operações de manutenção e fabricação, bem como na aplicação inadequada do éter fabricado nos reatores de chumbo para uso medicinal.

Na pesquisa do material resistente à ação corrosiva do ácido sulfúrico a 140°C, 85% de concentração e álcool etílico, obteve-se sucesso com ligas de ferro fundido com alto teor de silício (14 a 15% de Si), encontradas no mercado nacional a nível comercial.

Um projeto do reator de ferro-silício encamisado em aço carbono é apresentado neste trabalho.



ÍNDICE

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais	1
1.2. Pesquisa Bibliográfica	4
1.3. Objetivo do Trabalho	6

CAPÍTULO II

2. FERROS FUNDIDOS

2.1. Definição	7
2.2. Diagrama de Equilíbrio Fe-C-Si	7
2.3. Fatores que Influem na Estrutura dos Ferros Fundidos	12
2.4. Componentes Estruturais dos Ferros Fundidos	14
2.5. Fatores que Influem nas Características de Grafitização dos Ferros Fundidos	18
2.6. Ferro Fundido Cinzento	22
2.6.1. Características	22
2.6.2. Classificação	23



2.6.3. Propriedades	23
2.6.4. Elementos de Liga nos Ferros Fundidos Cinzentos e Ferros Fundidos Ligados	32
2.6.5. Ferros Fundidos Cinzentos de Alto Teor em Liga	34

CAPÍTULO III

3. FERRO-SILÍCIO

3.1. Introdução	43
3.2. Composição Química do Ferro-Silício	44
3.3. Propriedades Físicas e Mecânicas do Ferro com Alto Silício	45
3.4. Microestrutura dos Ferros Fundidos com Alto Silício	48
3.5. Resistência à Corrosão	56
3.5.1. Ácido Sulfúrico	56
3.5.2. Ácido Nítrico	57
3.5.3. Ácido Clorídrico	57
3.5.4. Ácido Fosfórico	58
3.6. Resistência aos Ácidos, Sais e suas Misturas	59
3.7. Fundição de Peças em Ferro-Silício	75
3.7.1. Modelos de Projeto	79
3.7.2. Moldagem	82



3.7.3. Fundição	86
3.7.4. Absorção de Hidrogênio	91
3.8. Tratamento Térmico	95
3.8.1. Recozimento	96
3.9. Limpeza, Rebarbação, Usinagem e Solda	99
3.10. Conclusão	100

CAPÍTULO IV

4. TOXICOLOGIA DO CHUMBO

4.1. Considerações Gerais	102
4.2. Propriedades	102
4.3. Análise de Risco	103
4.3.1. Classificação do Risco de Toxidez	103
4.3.2. Códigos de Classificação de Riscos Tóxicos	104
4.4. Toxicologia e Primeiros Socorros.	104
4.4.1. Riscos	104
4.4.2. Absorção de Chumbo	106
4.4.3. Assimilação do Chumbo	109
4.4.4. Dermatites por Compostos de Chumbo	110
4.4.5. Sintomas de Envenenamento	111
4.4.6. Medida da Absorção	114



4.4.7. Primeiros Socorros	118
4.5. Medidas Preventivas	119
4.5.1. Generalidades	119
4.5.2. Controle do Ambiente	120
4.5.3. Ventilação	121
4.5.4. Outras Medidas de Controle	123
4.5.5. Ordem e Limpeza	124
4.6. Seleção dos Trabalhadores	126
4.6.1. Exame Físico	126
4.6.2. Valor dos Controles Médicos	128
4.6.3. Treinamento dos Trabalhadores	129
4.6.4. Higiene Pessoal	130
4.7. Equipamento de Proteção Individual	132
4.8. Conclusão	132

CAPÍTULO V

5. CORROSÃO DAS LIGAS DE FERRO-SILÍCIO

5.1. Métodos de Ensaio à Corrosão	137
5.1.1. Ensaaios de Corrosão em Fábrica	138
5.1.2. Duração do Ensaio	140
5.1.3. Limpeza das Amostras do Ensaio	141



5.1.4. Avaliação dos Resultados	142
5.2. Descrição do Ensaio de Corrosão das Ligas de Ferro-Silício	146
5.3. Ensaio de Corrosão	149
5.4. Resistência Mecânica	152
5.5. Conclusão	156

CAPÍTULO VI

6. PROJETO DO REATOR E ENCAMISADO

6.1. Informações de Projeto	157
6.2. Projeto do Reator	158
6.2.1. Programa ELFIN	159
6.2.2. Seção VIII, ASME	163
6.2.3. Conclusão sobre a Espessura de Parede do Reator	168
6.2.4. Desenho do Reator em Ferro Silício	169
6.3. Projeto da Camisa	170
6.3.1. Memorial de Cálculo	170
6.3.2. Conclusão sobre a Espessura de Parede da Camisa do Reator	175
6.3.3. Desenho da Camisa do Reator em Aço Carbono	



ASTM A-285-Grau A	176
6.4. Cálculo do Flange	177
6.4.1. Memória de Cálculo	179
6.4.2. Conclusão sobre a Espessura do Flange	185
6.5. Conclusão	187

CAPÍTULO VII

7. ASPECTOS ECONÔMICOS

7.1. De Manutenção	189
7.1.1. Reatores de Chumbo	189
7.1.2. Reatores de Ferro-Silício	190
7.1.3. Reatores de Aço Carbono Vitrificado	190
7.2. De Fabricação	191
7.2.1. Reatores de Chumbo	191
7.2.2. Reatores de Aço Carbono Vitrificado	191
7.2.3. Reatores de Ferro-Silício	191
7.3. Vida Útil	192
7.4. Custo Geral	193
7.5. Conclusão	193

CAPÍTULO VIII

ÍNDICE DE FIGURAS

8. COMENTÁRIOS FINAIS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES

8.1. Comentários Finais	195
8.2. Conclusões	198
8.3. Sugestões	199

BIBLIOGRAFIA	201
--------------	-----

APÊNDICE 1 - Dados Técnicos, Resultados e Análise dos Testes de Corrosão Desenvolvidos com Três Ligas de Ferro-Silício	204
--	-----

APÊNDICE 2 - Fotografias do Ensaio de Corrosão	225
--	-----



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1	- Diagrama de Equilíbrio Fe-C	8
Fig. 2	- Diagrama de equilíbrio metaestável Fe-C-Si para quatro diferentes teores de silício	9
Fig. 3	- Forma de distribuição dos veios de grafita, segundo as normas ASTM e da AFS	16
Fig. 4	- Capacidade de amortecimento do ferro fundido em comparação com o aço	30
Fig. 5	- Micrografia de ferro fundido de alto silício, apresenta a fase alfa, (de silício-ferrita) e grafita em flocos, (120x)	50
Fig. 6	- Micrografia de ferro de alto silício ilustrando o tipo de grafita reticular, (600x)	51
Fig. 7	- Micrografia de um ferro de alto silício mostrando o tipo de grafita acicular, ou de bastonetes, (120x)	52
Fig. 8	- Exemplo de uma segunda fase, carboneto, num ferro de alto silício; tem aparência de cementita e se distribui ao acaso na espessura da peça. É removível por tratamento térmico, (600x)	53
Fig. 9	- Ferro fundido com 17% de silício, mostrando a estrutura dupla, (600x)	54
Fig. 10	- Micrografia num ferro fundido contendo alto teor de fósforo, mostrando uma terceira fase, a de um	



	fosfeto, (1500x)	54
Fig. 11	- Resistência do Duriron ao ácido sulfúrico	62
Fig. 12	- Taxa de corrosão do Duriron em ácido sulfúrico a 30°C	62
Fig. 13	- Taxa de corrosão do Duriron ao ac. nítrico	63
Fig. 14	- Diagrama de equilíbrio dos ferros fundidos de alto silício comercial; ligas contendo 15% Si e 0,65 Mn	76
Fig. 15	- Exemplo de contração interna produzida por variação de temperatura e má alimentação do molde. Partes da peça eram destacáveis, em placas	89
Fig. 16	- Reator em chumbo, projetado em 1907	158
Fig. 17	- Modelo nº 1 com sua curva elástica (Fundo Torrisférico)	160
Fig. 18	- Modelo nº 2 com sua curva elástica, (Fundo Elíptico)	161
Fig. 19	- Reator de ferro-silício	169
Fig. 20	- Camisa do reator de ferro-silício	170
Fig. 21	- Camisa do reator de ferro-silício	176
Fig. 22	- Flange sobreposto superior	186
Fig. 23	- Flange sobreposto inferior	187
Fig. 24	- Desenho de conjunto do reator	188



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-	Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, de acordo com a EB-126 da ABNT	24
Tabela 2-	Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, segundo a ASTM	25
Tabela 3-	Composição e propriedades de ferros fundidos resistentes à corrosão	37
Tabela 4-	Faixa de composição e propriedades mecânicas de ferros fundidos resistentes ao calor.	41
Tabela 5-	Ferros fundidos de alto silício; marcas comerciais e composições químicas em %	45
Tabela 6-	Resistência aos ácidos	60
Tabela 7-	Resistência à mistura de ácidos	61
Tabela 8-	Resistência aos álcalis	61
Tabela 9-	Resistência a mistura ácido mais sal	63
Tabela 10-	Resistência aos sais	64
Tabela 11-	Resistência a vários reagentes químicos	65
Tabela 12-	Resistência à corrosão	65
Tabela 13-	Areias típicas usadas no IPT de São Paulo, para moldagem de ferros fundidos alto silício	83
Tabela 14-	Plano teste de corrosão	147
Tabela 15-	Taxa de corrosão de 74 dias de teste	149
Tabela 16-	Taxa de corrosão do 18º ao 74º dias de teste	150
Tabela 17-	Taxa de corrosão do 18º ao 74º dias de teste com	



o coeficiente de segurança 3

152

Tabela 18- Perda de peso no ensaio de corrosão (504 horas)
dos corpos de prova submetidos ao ensaio de
flexão

153

Tabela 19- Valores de carga e deflexão dos corpos de prova
submetidos ao ensaio de flexão

154

1.1. Considerações Gerais



CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver material alternativo para ser utilizado na confecção de reatores para fabricação de éter sulfúrico, em substituição aos utilizados atualmente na Fábrica Presidente Vargas (FPV, Piquete, São Paulo), feitos de ligas de chumbo, cujo projeto inicial data de 1907.

O éter pode ser usado como anestésico, refrigerante e como solvente (farmacopéia americana) [1]. Na FPV é utilizado na fabricação de Pólvoras de Guerra.

O éter é obtido mediante reação de desidratação do álcool etílico por ácido sulfúrico concentrado em um processo contínuo de eterificação. É um processo simples, e muito usado. O método geral de obtenção foi descrito pelo notável químico inglês Alexandre William Williamson no século passado [2].

O éter é um líquido incolor, muito volátil e de baixa viscosidade e densidade relativa de 0,713 a 20°C [2]. Uma solução de ácido sulfúrico a 85% de concentração



é colocada em um recipiente aquecido a uma temperatura de aproximadamente 140°C , e através da adição contínua de álcool etílico tem-se a evaporação de compostos, entre os quais o éter sulfúrico.

Como materiais alternativos resistentes à violenta ação corrosiva da solução de ácido sulfúrico a 85% de concentração à temperatura de 140°C , encontráveis no mercado nacional e fornecidos em níveis comerciais, obteve-se sucesso com as ligas de ferro fundido com alto teor de silício (14 a 15% de Si). Essas ligas de ferro-silício permitem a obtenção de éter sem particulados de chumbo (contaminante tóxico), que não permite a aplicação deste éter como anestésico.

Os reatores utilizados atualmente são de concepção antiga e feitos totalmente em ligas de chumbo com pureza elevada (99.8% mínimo), aquecidos por uma serpentina de chumbo imersa na solução ácida, por onde circula vapor saturado a 4 kgf/cm^2 de pressão e temperatura aproximada de 142°C . Possuem um diâmetro de 1,20 m e altura de 1,32 m, providos de tampa confeccionada da mesma liga. Não possuem isolamento térmico. Estes reatores determinam um baixo rendimento da Usina de Fabricação de Éter, pois apresentam muitos problemas de manutenção, principalmente furos nos cordões de solda provocados pela temperatura de 140°C da solução ácida e pela pressão interna na serpentina.



Para ter-se uma idéia da agressividade desta solução, em experiência realizada no ano de 1988 com chapa laminada de 6 milímetros de espessura em aço inoxidável AISI 316 L, esta corroeu-se totalmente em 6 dias, dando uma taxa de corrosão de 1 mm/dia.

Foram desenvolvidas experiências com três ligas de ferro-silício (Ferro-Silício, Ferro-Silício-Molibdênio e Ferro-Silício-Cromo), cujos resultados do comportamento no meio corrosivo são apresentados no decorrer deste trabalho; os mesmos evidenciaram-se altamente compatíveis com o ambiente corrosivo, podendo-se inferir as seguintes vantagens com a utilização destas ligas:

- resistentes à ação do meio corrosivo;
- material não contaminante do éter com partículas tóxicas ao organismo humano;
- menor custo de manutenção comparado ao atual em chumbo;
- maior confiabilidade no processo devido ao funcionamento contínuo;
- menor custo de fabricação comparado com o reator em chumbo ou de aço carbono vitrificado.

O dimensionamento do reator em ferro-silício foi desenvolvido junto com a Electro Aço Altona, de Blumenau, Santa Catarina, único fabricante de equipamentos de ferro-silício no país em escala comercial até a presente data. Utilizou-se o sistema CAD/FEG para montar um modelo para acompanhamento do projeto e também foi dimensionado



usando-se a Seção VIII, Divisão I da ASME (The American Society of Mechanical Engineers).

O dimensionamento da camisa do reator foi baseado na Seção VIII, Divisão I, Vol I e II da ASME e confeccionado em aço carbono ASTM A285 GrA, conforme consta do conteúdo desta obra.

No desenvolvimento deste trabalho conseguiu-se interrelacionar três áreas afins da engenharia, ou seja, a Engenharia de Projetos no projeto do reator encamisado, a Engenharia de Materiais na avaliação de material resistente ao meio corrosivo e a Engenharia de Segurança do Trabalho na diminuição dos trabalhos com chumbo na confecção e manutenção dos reatores e também na higienização do éter sulfúrico obtido sem particulados de chumbo (que são altamente tóxicos ao organismo humano).

Em suma, com a utilização do ferro-silício na confecção dos reatores para fabricação de éter tem-se a otimização do processo produtivo e a higienização do processo de fabricação dos reatores e do produto obtido, éter sulfúrico.

1.2. Pesquisa Bibliográfica

Fato a ser ressaltado na pesquisa bibliográfica foi a grande dificuldade de obter-se informações precisas sobre as propriedades físicas e mecânicas das diversas ligas de ferro-silício.



A bibliografia, com a qual tomou-se contato, ressaltava basicamente a aplicação destas ligas como resistentes à corrosão ácida, principalmente aos ácidos nítrico e sulfúrico [3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11].

Informações sobre as propriedades físicas e mecânicas do ferro-silício foram encontradas somente em catálogos de fabricantes e em uma publicação do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) de 1963 [6]. Estes dados abrangem a classe dos ferros silício, não se referindo às diversas ligas de modo específico.

Nenhuma das fontes bibliográficas citou como se processam as variações das propriedades físicas e mecânicas com a elevação da temperatura.

Estes dados, por falta de precisão, criaram dificuldades no dimensionamento do reator.

Segundo a Electro Aço Altona, fabricante de ligas de ferro-silício no mercado nacional, os dados utilizados em seus projetos, independente da liga e da temperatura de trabalho, são os constantes de seu catálogo [7].

Face à dificuldade de obtenção de informações técnicas sobre o ferro-silício, procurou-se colocar todas as obtidas durante a execução deste trabalho em um capítulo específico a fim de registrar o que já existe e é de domínio público.



1.3. Objetivo do Trabalho

Este trabalho visa a escolha de uma liga de ferro-silício existente comercialmente no País, que apresente o melhor desempenho com respeito à resistência à corrosão e resistência mecânica, a ser empregada no desenvolvimento do projeto de um reator encamisado em aço carbono, para realizar a fabricação de éter sulfúrico, utilizado com fins industriais (fabricação de pólvoras de guerra) e medicinais.



CAPÍTULO II

2. FERROS FUNDIDOS

2.1. Definição

Ferro Fundido é a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2%, em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veias ou lamelas de grafita [4].

2.2. Diagrama de Equilíbrio Fe-C-Si

O diagrama da Fig. 1 é de natureza metaestável ou de pseudoequilíbrio, pois, com o tempo, pode ocorrer decomposição do Fe_3C em ferro e carbono, este último na forma grafita [4].

Essa decomposição é acelerada pela presença de silício, de modo que convém estudar o efeito desse elemento no diagrama de equilíbrio Fe-C.



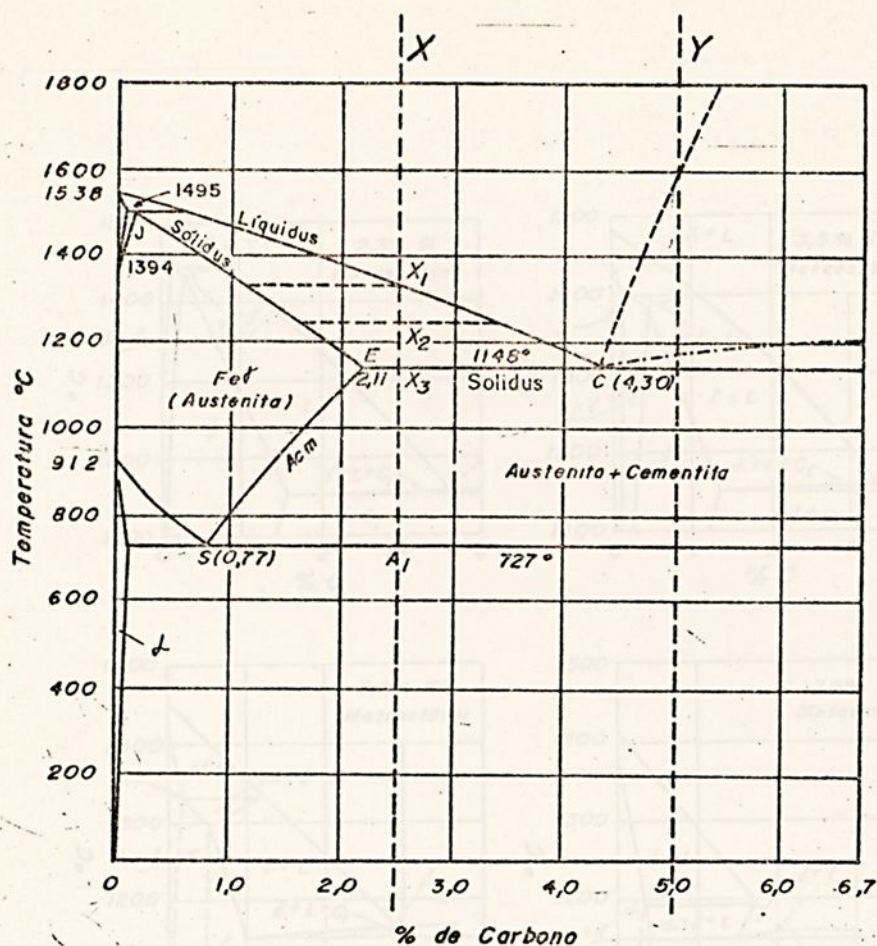


Fig. 1 - Diagrama de equilíbrio Fe-C.

Trata-se, assim, de estudar um diagrama ternário, o que pode ser feito tomando-se seções do diagrama Fe-C-Si, para 2,3%, 3,5%, 5,2% e 7,9%. Os dois primeiros correspondem a ligas Fe-C-Si de maior uso prático. Nas figuras são mostradas apenas as linhas de transformação para temperatura elevada, a partir de 1000°C.

Pela sua observação verifica-se que a principal alteração refere-se à composição do eutético, o qual diminui à medida que aumenta o teor de silício.

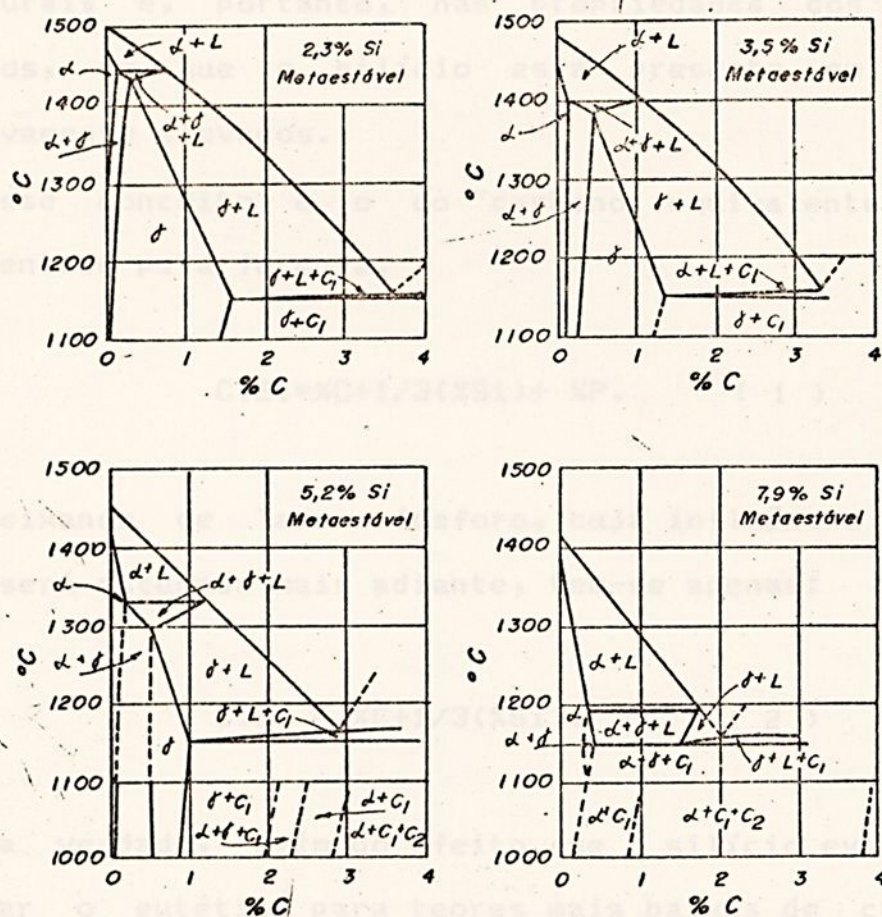


Fig. 2 - Diagramas de equilíbrio metaestável Fe-C-Si para quatro diferentes teores de silício.

Ao mesmo tempo, nota-se que a reação do eutético ocorre num intervalo de temperatura, ao contrário do que acontece no diagrama binário Fe-C, onde tal reação se dá a uma temperatura praticamente constante.

No caso dos ferros fundidos tomados como ligas ternárias, utiliza-se fórmula que possibilita levar em consideração o efeito do silício nas transformações estruturais e, portanto, nas propriedades dos ferros fundidos, em que o silício está presente em teores relativamente elevados.

Esse conceito é o do "carbono equivalente" e é representado pela fórmula:

$$C.E. = \%C + 1/3(\%Si) + \%P. \quad (1)$$

Deixando de lado o fósforo, cuja influência nessas ligas será estudada mais adiante, tem-se apenas:

$$C.E. = \%C + 1/3(\%Si). \quad (2)$$

Na verdade, além do efeito que o silício exerce de deslocar o eutético para teores mais baixos de carbono, uma outra característica desse elemento, fundamental sob o ponto de vista de estrutura e propriedades mecânicas, relaciona-se com sua tendência grafitizante, ou seja, promover a decomposição de Fe_3C em ferro e carbono, e este último sob a forma de grafita lamelar.

O diagrama de equilíbrio Fe-C é de natureza metaestável, a rigor trata-se de um diagrama Fe- Fe_3C . O equilíbrio estável corresponde, de fato, à liga ferro-grafita, ou seja, às condições de equilíbrio são



tais que ocorre a decomposição do Fe_3C em Fe e C, este último na forma de grafita.

Essa decomposição depende da velocidade de resfriamento e da presença de determinados elementos de liga.

Ao solidificar um ferro fundido cinzento hipoeutético, por exemplo com 3% de carbono e 2,3% de silício, resultam em primeiro lugar, cristais primários de austenita, cuja quantidade aumenta com decréscimo da temperatura. A cerca de 1150°C , o líquido remanescente solidifica com um teor de carbono de aproximadamente 3,6% (Fig. 2). Nesse momento, por reações complexas, ainda não devidamente explicadas, ocorre em grande parte a grafitização. Admite-se, entretanto, que, no curto intervalo de tempo em que ocorre a solidificação final, fica estabelecida a quantidade, a forma e a distribuição da grafita.

Abaixo da temperatura de solidificação, no exemplo considerado; têm-se, pois, dendritas de austenita, cujo teor de carbono decresce com a queda da temperatura, formando uma matriz em que estão distribuídas lamelas de grafita. O carbono, que é precipitado da austenita, aparece em parte como perlita e em parte como grafita leve. A quantidade desta depende, como já se mencionou, da velocidade de resfriamento e do teor de silício.



Ao ultrapassar a última linha de transformação, correspondente à temperatura do eutetóide, a austenita remanescente passa a perlita e a estrutura da liga é constituída de perlita com lamelas de grafita, podendo, ainda, com resfriamento mais lento, a perlita decompor-se parcialmente em ferrita e grafita. A estrutura consistirá, então, de perlita, ferrita e lamelas de grafita [4].

2.3 Fatores que Influem na Estrutura dos Ferros Fundidos

São dois os fatores preponderantes na determinação da estrutura dos ferros fundidos:

- Composição química e
- Velocidade de resfriamento.

Composição química - Os elementos que mais influem na estrutura são o carbono e o silício; o carbono determina a quantidade de grafita que se pode formar e o silício é essencialmente elemento grafitizante, favorecendo a decomposição do carbono e ferro; sua presença, independente do teor de carbono, pode fazer um ferro fundido tender para o cinzento ou para o branco. O manganês, sempre presente, tem efeito oposto ao do silício, isto é, estabiliza a cementita e, assim, contrabalança, de certo modo, a ação grafitizante do silício. A rigor, o manganês nos ferros fundidos, tanto



quanto nos aços, é adicionado como dessulfurante; entretanto, como na prática há sempre um excesso de manganês, este atua como estabilizador da perlita; daí o seu efeito oposto ao do silício e a sua utilidade para produzir estrutura com matriz predominantemente perlítica, sobretudo em peças fundidas volumosas.

Os outros elementos, impurezas normais, fósforo e enxôfre, não têm uma ação muito significativa sob o ponto de vista de tendência grafitizante. Apenas o fósforo é um estabilizador relativamente forte do carboneto de ferro; sua principal ação é na estrutura do material, porque forma com o ferro e o carbono de natureza eutética - carboneto de ferro e fosfeto de ferro - de aparência branca e perfurada, chamada Steadita.

A ação desses elementos, assim como de outros elementos de liga nos característicos dos ferros fundidos, será estudada mais adiante.

Velocidade de resfriamento - Esse fator relaciona a velocidade de resfriamento propriamente dita durante a solidificação no interior dos moldes e a espessura das peças moldadas, significando que em peças de secções de diferentes espessuras, ocorrem diversas velocidades de resfriamento.

Para elevadas velocidades de resfriamento - como as que se verificam em secções finas ou nas áreas adjacentes às paredes do molde - não há muito tempo para a decomposição da cementita de modo que, dependendo dos



teores de carbono e de silício, pouca ou nenhuma grafitização ocorre e há tendência para formar-se ferro fundido branco. Produz-se o que se chama na prática de secções coquilhadas.

Com as velocidades de resfriamento lentas das secções mais espessas ocorre uma apreciável grafitização, dependente sempre do teor de silício. A estrutura será constituída essencialmente de perlita e grafita. Para resfriamento ainda mais lento e teor de silício mais elevado, a cementita da perlita pode também decompor-se parcialmente, originando-se assim a estrutura constituída de veios de grafita, perlita e ferrita. Essa estrutura confere ao material características de baixa dureza e excelente usinabilidade, além de uma resistência mecânica média.

A velocidade de resfriamento não influi apenas na grafitização; outra ação importante é na forma, distribuição e tamanho dos veios de grafita. Velocidades altas produzem veios finos, como uma distribuição dentrítica, comumente indesejável. Velocidades médias resultam em distribuição e tamanhos normais, e velocidades muito lentas em uma distribuição de veios grosseiros de grafita.

2.4. Componentes Estruturais dos Ferros Fundidos



O mais importante é a grafita, por ser o elemento que determina fundamentalmente as características mecânicas dos ferros fundidos. Costuma-se comparar os ferros fundidos aos aços, chamando-o de aço contendo grafita em veios, pois, a rigor, os outros constituintes estruturais importantes - cementita, perlita e ferrita - são os contribuintes básicos dos aços. A razão por que os ferros fundidos apresentam propriedades tão distintas das dos aços reside no fato dos veios de grafita constituírem uma solução de continuidade na estrutura ou matriz básica do material ou, em outras palavras, interromperem a uniformidade ou continuidade dessa matriz [4].

A ASTM (American Society for Testing Materials) e a AFS (American Foundrymen's Society) classificam o aspecto e a forma de apresentação da grafita em cinco tipos, como segue [4]:

A - irregular desorientada,

B - em roseta,

C - desigual irregular,

D - interdendrítica desorientada e

E - interdendrítica orientada,

representados esquematicamente na Fig. 3.





Veios de grafita do tipo A



Veios de grafita do tipo B



Veios de grafita do tipo C



Veios de grafita do tipo D



Veios de grafita do tipo E

Fig. 3 - Forma de distribuição dos veios de grafita, segundo as normas da ASTM e da AFS.

Do mesmo modo, essas Associações classificam a grafita, pelas suas dimensões, em oito tamanhos, de 1 a 8, correspondendo o nº 1 às dimensões maiores (veio mais longo) e o nº 8 às dimensões menores.

A ferrita (do latim "ferrum") é ferro no estado alotrópico alfa; contendo em solução traços de carbono; apresenta também uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui baixa dureza e baixa resistência à tração, cerca de 28 kgf/mm², mas excelente resistência ao choque e elevado alongamento [4].

A cementita (do latim "caementum ") é o carboneto de ferro Fe₃C contendo 6,67% de carbono; muito dura (na escala Moh's ocuparia aproximadamente o lugar do feldspato), quebradiça, é responsável pela sua menor ductilidade. Possui estrutura cristalina ortorômbica [4].

A perlita (nome devido à "nuance" de cores de madrepérola que esse constituinte freqüentemente apresenta ao microscópio) é a mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita, na forma de lâminas finas (de espessura raramente superior a um milésimo de milímetro) dispostas alternadamente. As propriedades mecânicas da perlita são, portanto, intermediárias entre as da ferrita e da cementita, dependendo, entretanto, do tamanho das partículas de cementita. Sua resistência à tração é, em média, 75 kgf/mm². A proporção de perlita num aço cresce de 0% para ferro até 100% para aço eutetóide (0,77% de carbono), de modo que um aço com 0,5% de carbono, por exemplo, apresentará cerca de 65,0% de perlita [4].



A ledeburita, que ocorre nos ferros fundidos branco, é um constituinte formado de pequenos glóbulos de perlita, sobre um fundo de cementita; por isso apresenta elevada dureza [4].

A steadita é um constituinte de natureza eutética, compreendendo partículas de fosfeto de ferro Fe_3P e carboneto de ferro Fe_3C , com baixo ponto de fusão (inferior a $982^\circ C$). Ocorre em áreas interdendríticas, formando uma segregação, pois essas áreas são as últimas que solidificam. A steadita ocorre quando a quantidade de fósforo presente é superior a 0,15%. É muito dura e frágil [4].

2.5. Fatores que Influem nas Características de Grafritização dos Ferros Fundidos -

A grafritização (forma, distribuição e dimensões dos veios de grafita) e, portanto, a estrutura e as características mecânicas dos ferros fundidos, são influenciados por outros fatores que não apenas a composição química e a velocidade de resfriamento.

O mais importante é a chamada "inoculação" que consiste na adição de uma liga metálica no metal, enquanto estiver líquido, quer no próprio forno ou na "panela de fundição", pouco antes do vazamento do metal ou no jorro do metal líquido quando da passagem do forno para a panela de vazamento. Acredita-se que essa prática



provoca o aparecimento de núcleos de metal não dissolvido ou precipitado, os quais atuam como centros de solidificação. O efeito consiste num decréscimo da tendência de formação de ferro branco, ou seja numa tendência à grafitação, sem consequência apreciável na estabilidade da perlita. Além disso, fica favorecida a formação de veios menores de grafita, com distribuição mais uniforme. Existem muitos inoculantes comerciais, os quais podem ser agrupados da seguinte maneira:

- Inoculantes grafitizantes comuns, incluindo grafita, silício metálico, ferro silício (com 50%, 75% ou 85% de Si) e siliceto de cálcio.
- Inoculantes grafitizantes especiais, que se caracterizam por apresentar um maior efeito grafitizante (podendo, pois, ser utilizados em quantidades respectivamente pequenas) e que incluem, entre outros, os seguintes : Ca-Si, Ca-Si-Ti, Ca-Si-Mn, Si-Zr-Ca, Si-ba, Si-Mn-Ca-Ba, Si-terras raras, Si-Césio, etc..
- Inoculantes estabilizadores (também chamados perlitizantes), recomendados para ferros fundidos cinzentos de carbono equivalente elevado (4,0 a 4,5%) e que incluem entre outros, Cr-Si, siliceto de cromo, Cr-Si-Mn, Cr-Si-Mn-Zr.

A temperatura do ferro fundido liquefeito dever ser, no mínimo, de $1455 \pm C$.



Em resumo, pode-se afirmar que a inoculação do ferro fundido cinzento tem por objetivo:

- aumentar a tendência à grafitação e, portanto, diminuir a tendência ao coquilhamento;
- melhorar a tendência à formação de estruturas mais finas e uniformes em secções de espessuras variadas;
- reduzir o super-resfriamento, para favorecer a formação de grafita tipo A e diminuir ou eliminar a grafita interdendrítica, sobretudo a do tipo D;
- melhorar as propriedades mecânicas;
- finalmente, possibilitar a obtenção de ferros fundidos cinzentos de alta resistência, com carbonos equivalentes relativamente baixos.

Outro fator a considerar é o "superaquecimento", ou seja a temperatura de aquecimento do ferro fundido quando inteiramente liquefeito. Deve-se manter, geralmente, para os melhores resultados, o metal fundido a uma temperatura muito alta (1500 a 1700°C), o que exige um forno elétrico como forno de fusão. O superaquecimento resulta em início de grafitação a temperaturas mais baixas, o que promove a formação de veios menores e mais finos de grafita.

Outro resultado obtido pelo superaquecimento diz respeito ao material tornar-se menos sensível à influência da variação da secção das peças. Nota-se, entretanto, uma tendência da grafita adquirir uma disposição interdendrítica, com conseqüente queda da



resistência mecânica do material, o que é corrigida pela inoculação.

Pode-se, contudo, estabelecer certos fatos associados à formação da grafita, alguns dos quais já expostos, e que podem ser resumidos da seguinte maneira:

- a precipitação da grafita depende dos teores de carbono e silício e da velocidade de resfriamento, através de uma certa faixa de temperatura.
- mantidos constantes o teor de carbono e a velocidade de resfriamento, quantidades crescentes de Si, resultam em quantidades crescentes de grafita e veios de grafita maiores;
- mantidos constantes o Si e a velocidade de resfriamento, decréscimo do carbono total origina menor quantidade de grafita, geralmente em veios menores;
- a precipitação da grafita não é limitada pela quantidade de C presente além da composição do eutetóide (0.80%), mas se houver quantidades suficientes de grafita e a velocidade de resfriamento for muito pequena, essa precipitação pode continuar até praticamente eliminar a presença de qualquer carbono combinado;
- a grafitização é acelerada pela presença de núcleos de grafita, os quais tendem a ser destruídos por altas temperaturas de fusão [4].



2.6. Ferro Fundido Cinzento

2.6.1. Características

Os ferros fundidos cinzentos são muito utilizados devido às suas características de fácil fusão, boa resistência mecânica, excelente usinabilidade, boa resistência ao desgaste e boa capacidade de amortecimento de vibrações mecânicas.

Apresenta uma correlação entre as suas propriedades e a sua microestrutura. Portanto, pode-se prever, com razoável aproximação, as propriedades do ferro fundido cinzento em função da sua composição química, principalmente teores de carbono-grafítico e silício, da espessura das peças e da forma como a grafita se apresenta.

Os ferros fundidos cinzentos apresentam-se dentro de uma faixa de composição química muito ampla:

C : 2,00 a 4,00%;

S : 1,00 a 3,00%;

Mn: 0,30 a 1,00%;

P : 0,10 a 1,00%;

Si: 0,05 a 0,25%.

É comum adicionar-se outros elementos de liga, visando alterar certas características do material.



2.6.2. Classificação

Segundo a ABNT, os ferros fundidos são designados pelas letras FC, indicativas de "ferro fundido cinzento", seguindo-se dois algarismos representativos do limite máximo de resistência à tração, conforme Tabela 1.

2.6.3. Propriedades

A resistência à tração é mais importante e o próprio agrupamento dos ferros fundidos em classes pelas Associações de Normas Técnicas é feito com base nos valores de limite de resistência à tração.

Essa propriedade e, de certo modo, as outras características físicas dos ferros fundidos, dependem fundamentalmente da composição química, da velocidade de resfriamento a partir da temperatura de fusão até a temperatura ambiente.



Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, de acordo com a EB-126 da ABNT.

Classe	Diâmetro da barra de ensaio		Limite de resistência à tração (mín.) kgf/mm ²	Dureza Brinell (valores máximos)	Resistência à flexão estática (valores médios) kgf/mm ²
	D, mm (no estado bruto de fusão)	d, mm (usinada)			
FC10	30	20	10	201	
FC15	13	8	23	241	34
	20	12,5	18	223	32
	30	20	15	212	30
	45	32	11	201	27
FC20	13	8	28	255	41
	20	12,5	23	235	39
	30	20	20	223	36
	45	32	16	217	33
FC25	13	8	33	269	—
	20	12,5	28	248	46
	30	20	25	241	42
	45	32	21	229	39
FC30	20	12,5	33	269	—
	30	20	30	262	48
	45	32	26	248	45
FC35	20	12,5	38	—	—
	30	20	35	227	54
	45	32	31	269	51
FC40	30	20	40	—	60
	45	32	36	—	57



Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, segundo a ASTM.

Classe	Diâmetro do corpo de prova mm	Limite de resistência à tração kgf/mm ²	Dureza Brinell	Observações
20	22,2	15,5/18,3	160/220	peças finas: espessura até 13mm C - 3,50 a 3,80% Si - 2,40 a 2,60%
	30,5	12,9/16,9	160/180	peças médias: espessura de 13 a 25mm C - 3,40 a 3,60% Si - 2,30 a 2,50%
	50,8	12,7/15,5	130/180	peças grossas: espessura sup. a 25mm C - 3,10 a 3,30% Si - 2,20 a 2,40%
25	22,2	18,3/20,4	160/180	peças finas: espessura até 13mm C - 3,30 a 3,50% Si - 2,20 a 2,40%
	30,5	18,3 a 20,4	179/207	peças médias: espessura de 13 a 25mm C - 3,20 a 3,40% Si - 2,20 a 2,40%
	50,8	18,3/21,4	179/217	peças grossas: espessura sup. a 25mm C - 3,00 a 3,30% Si - 1,90 a 2,20%
30	22,2	21,1 a 24,3	179/228	peças finas: espessura até 13mm C - 3,20 a 3,40% Si - 2,10 a 2,30%
	30,5	—	—	peças médias: espessura de 13 a 35mm C - 3,10 a 3,30% Si - 2,10 a 2,30%
	50,8	21,1 a 24,3	207/228	peças grossas: espessura sup. a 25mm C - 2,90 a 3,20% Si - 1,70 a 2,10%
35	22,2	25,3/28,1	179/228	peças finas: espessura até 13mm C - 3,10 a 3,30% Si - 2,00 a 2,20%
	30,5	24,6/27,4	207/228	peças médias: espessura de 13 a 25mm C - 3,00 a 3,25% Si - 1,80 a 2,10%
	50,8	24,6/26,7	183/217	peças grossas: espessura sup. a 25mm C - 2,80 a 3,10% Si - 1,60 a 2,00%



Continuação da Tabela 2.

Classe	Diâmetro do corpo de prova mm	Limite de resistência à tração kgf/mm ²	Dureza Brinell	Observações
40	22,2	29,5/32,3	212/241	peças finas: espessura de 13 a 25mm C - 3,00 a 3,20% Si - 1,90 a 2,20%
	30,5	28,1/33,0	207/241	peças médias: espessura de 13 a 25mm C - 2,95 a 3,15% Si - 1,70 a 2,00%
	50,8	28,8/31,6	180/217	peças grossas: espessura sup. a 25mm C - 2,75 a 3,00% Si - 1,50 a 1,90%
50	22,2	35,9/38,7	228/269	peças finas: espessura até 13mm C - 2,90 a 3,10% Si - 1,70 a 2,10%
	30,5	35,2/40,1	228/269	peças médias: espessura de 13 a 25mm C - 2,70 a 3,00% Si - 1,70 a 2,00%
	50,8	35,2/38,0	207/241	peças grossas: espessura sup. a 25 mm C - 2,55 a 2,85% Si - 1,40 a 1,70%
60	22,2	42,2/45,7	228/272	peças finas: espessura até 13mm C - 2,70 a 3,00% Si - 1,40 a 1,70%
	30,5	42,2/45,7	248/290	peças médias: espessura de 13 a 25 mm C - 2,50 a 2,85% Si - 1,90 a 2,10%
	50,8	42,2/45,0	212/248	peças grossas: espessura sup. a 25mm C - 2,50 a 2,80% Si - 1,20 a 1,50%



O módulo de elasticidade, nos ferros fundidos, não é uma constante, o que significa que esses materiais não obedecem à lei de Hooke - proporcionalidade entre tensão e deformação. Determina-se esse valor arbitrariamente, como sendo a inclinação da linha que une o ponto de origem da curva tensão-deformação e o ponto correspondente a $1/4$ do limite de resistência à tração. O módulo de elasticidade dos ferros fundidos, assim determinado, varia de 7.500 a 15.500 kgf/mm², dependendo, pois do limite de resistência à tração do material e do volume, forma e distribuição da grafita.

Outra propriedade que se costuma controlar é a resistência à ruptura transversal. No ensaio correspondente, os dados obtidos são a carga no centro, em kgf, e a flecha correspondente no centro, em mm. Geralmente, o valor dessa propriedade aumenta à medida que aumenta a resistência à tração ao passo que a flecha diminui, sem que haja correlação exata entre essas propriedades.

A dureza varia nos ferros fundidos, desde valores 100 Brinell, para os ferros fundidos de grande usinabilidade, até valores superiores a 600 Brinell, para os ferros fundidos brancos ou coquilhados. A interpretação das determinações de dureza pode levar a julgamentos errôneos sobre a qualidade do material, face à presença de grande quantidade de grafita, que se esmaga



com facilidade. Para ferros fundidos com dureza Brinell até 500, recomenda-se, portanto, o uso do processo Brinell com esfera de 10 mm e cargas de 3000 kg; quando a dureza for superior a 500, recomenda-se o método Rockwell, escala "C".

Pode-se admitir, como nos aços, uma relação entre a resistência à tração e a dureza Brinell dos ferros fundidos. De acordo com Mackenzie [12], a equação mais indicativa dessa relação é a seguinte: Resistência à tração = 1,82 Dureza Brinell.

A resistência a compressão é considerada propriedade de importância comercial. O valor da resistência à compressão é de 3 a 4,5 vezes superior ao da resistência à tração. Varia, nos ferros fundidos cinzentos, de cerca de 50 kgf/mm² para cerca de 140 kgf/mm².

O limite de fadiga varia aparentemente de modo linear, em relação à resistência à tração, na proporção de 0,40 a 0,55. Assim, os ferros fundidos cinzentos comuns apresentarão limites de fadiga entre cerca 6 kgf/mm² para cerca de 17,5 kgf/mm² adotado, nesses casos o ensaio de fadiga correspondente à tensões de dobramento em ciclos totalmente reversíveis.

A resistência ao choque foi considerada, durante muito tempo, uma propriedade secundária, por ser ferro fundido cinzento um material frágil.



Os tipos mais modernos, entretanto, mostram valores relativamente altos para essa propriedade. Assim é que ferros fundidos convenientemente ligados (com Ni e Mo, por exemplo, em baixos teores) apresentando valores para limite de resistência à tração da ordem de 40 a 50 kgf/mm², podem mostrar resistência ao choque variando de 7 kgf.m a 14 kgf.m.

Uma propriedade típica dos ferros fundidos cinzentos é sua capacidade de amortecimento. Define-se "capacidade de amortecimento" como "habilidade de um metal absorver vibrações, resultantes de tensões cíclicas por fricção interna, transformando a energia mecânica em calor". O ensaio usual, devido a Foeppel-Pertz [4] conduz a gráficos, como os representados na Fig. 4, os quais mostram a duração relativa de um impulso vibratório torcional conferido a corpos de ferro fundido e de aço. A importância dessa propriedade reside no fato de que esse material tem grande aplicação em máquinas ferramentas, sobretudo nas suas bases. A maior capacidade de amortecimento de ferro fundido, em relação ao aço, é atribuída aos veios de grafita, os quais, por não apresentarem resistência mecânica, constituem espécies de vazios na estrutura do material, o que permite deformação plástica do material localizado ao redor dos veios, sob tensões nominais menores que em outros casos.



Outra propriedade característica do ferro fundido cinzento é a usinabilidade. Os ferros fundidos cinzentos mais produzidos apresentam uma estrutura em que a matriz é ferrítica ou ferrítico-perlítica.

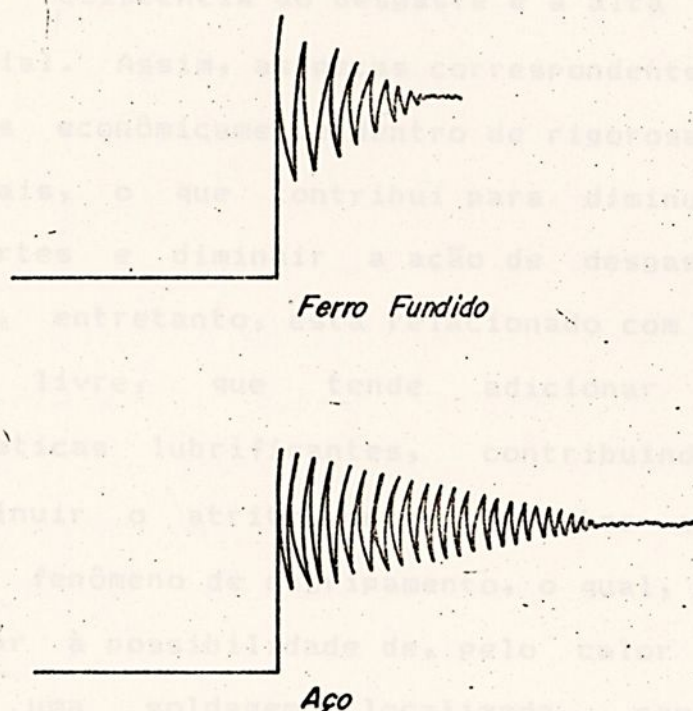


Fig. 4 - Capacidade de amortecimento do ferro fundido em comparação com o aço pelo método de ensaio Foepl-Pertz.

Além da influência evidente dos veios de grafita - quantidade, distribuição e tamanho - a própria matriz ou a porcentagem relativa de ferrita e perlita presente é fator importante na usinabilidade do material.

A resistência ao desgaste do ferro fundido cinzento é igualmente considerada uma característica importante, o que é, aliás, comprovado na prática pelo seu emprego usual em peças móveis de máquinas. Um dos fatores favoráveis ao comportamento de ferro fundido cinzento quanto à resistência ao desgaste é a alta usinabilidade do material. Assim, as peças correspondentes podem ser produzidas economicamente dentro de rigorosas tolerâncias dimensionais, o que contribui para diminuir o atrito entre partes e diminuir a ação de desgaste. O fator principal, entretanto, está relacionado com a presença de grafita livre, que tende adicionar ao material características lubrificantes, contribuindo igualmente para diminuir o atrito entre as partes em contato e evitar o fenômeno de engripamento, o qual, por sua vez, pode levar à possibilidade de, pelo calor desenvolvido ocorrer uma soldagem localizada, com consequente arrancamento de partículas, tornando novamente a superfície áspera. Aparentemente, a melhor estrutura para o ferro fundido cinzento, sob o ponto de vista de resistência ao desgaste, é a matriz 100% perlítica e grafita do tipo A, ou seja, veios irregulares e desorientados. O pior ferro fundido seria o que apresenta matriz ferrítica associada com grafita dendrítica, tipo D ou E [4].



2.6.4. Elementos de Liga nos Ferros Fundidos Cinzentos e Ferros Fundidos Ligados

Efeitos dos elementos de liga - embora seja possível produzir ferros fundidos cinzentos de alta qualidade sem a adição de elementos de liga, apenas com um controle rigoroso do carbono combinado e dos teores de silício e manganês e mais da técnica de fabricação, a adição de elementos de liga vem se tornando uma prática usual, por permitir não só obter maiores resistências com carbono equivalente mais elevado como também, porque as estruturas resultantes são menos sensíveis à variação da espessura das peças.

Nos ferros fundidos, os elementos de liga têm dois efeitos:

- tendem a decompor a cementina, ou seja, são elementos /grafitizantes: silício, alumínio, níquel, cobre e titânio;
- tendem a estabilizar os carbonetos, ou seja, retardam a formação de grafita: manganês, cromo, molibdênio e vanádio, entre outros. Estes elementos devem, pois, ser evitados, em peças de paredes finas.

Todos os elementos de liga tendem a aumentar a resistência à tração e dureza, sendo os mais eficientes, nesse sentido, o vanádio, o molibdênio e o cromo.



Normalmente, o molibdênio é adicionado em teores de 0,20% a 0,80%. Refina a perlita e favorece a obtenção de bainita. Além do efeito na matriz, o molibdênio exerce influência na grafita, que tende a "nodulizar". Finalmente aumenta a temperabilidade do ferro fundido e melhora as propriedades mecânicas a temperaturas elevadas. Raramente, é usado isoladamente.

O cromo e o vanádio aumentam inicialmente a resistência à tração, verificando-se, em seguida, entre 0,5% e 1,0% uma queda dessa propriedade devido ao excesso de carbonetos livres que tendem aparecer. A dureza, entretanto, continua aumentando.

O cromo é geralmente adicionado, quando isolado, até cerca de 30%. Acima desse teor, deve ser conjugado com um elemento grafitizante, sobretudo em peças de secções finas, com cantos vivos.

O cromo e o vanádio tornam a estrutura da matriz do ferro fundido cinzento mais perlítica e mais fina.

O cromo e o molibdênio aumentam a resistência a ruptura transversal. O níquel também, principalmente em ferros fundidos cinzentos com teor de carbono inferior a 3,0%.

O titânio, em teores de 0,08% a 0,25% de titânio residual, aumenta a resistência à ruptura transversal, sobretudo em ferros fundidos com teor de carbono superior a 3,4%. Do mesmo modo atua o vanádio, que, em teores de 0,10% a 0,20%, em secções de aproximadamente 75 mm de



diâmetro, aumenta a resistência à ruptura transversal de cerca de 50%.

O níquel, cujo efeito em relação à resistência à ruptura transversal já foi mencionado, é um elemento grafitizante; as quantidades mais comumente adicionadas situam-se entre 0,5% e 1,5%, para contrabalançar o efeito estabilizador de elementos como cromo, molibdênio e vanádio; por essa razão é raramente adicionado isoladamente.

O cobre - outro elemento grafitizante - é adicionado usualmente em teores de 0,5% a 2,0%. O cobre melhora a usinabilidade do material e sua resistência à corrosão, principalmente em meios contendo enxofre. Pode ainda ser utilizado conjuntamente com o cromo ou o molibdênio ou cromo-molibdênio.

Finalmente o estanho tem sido usado até teores de 0,10% / 0,15% como elemento estabilizador da perlita. Seu efeito é mais notado em ferros fundidos de alto teor de carbono, acima do eutético. Diminui, entretanto, a resistência ao choque, motivo pelo qual se deve procurar seu teor abaixo de 0,10% [4].

2.6.5 Ferros Fundidos Cinzentos de Alto Teor em Liga

Do mesmo modo que nos aços, a adição de elementos de liga em teores elevados nos ferros fundidos tem por objetivo conferir-lhe propriedades especiais, como



resistência à corrosão, resistência ao calor, etc., características essas que são apenas ligeiramente melhoradas com baixos teores de alguns elementos de liga.

Entre os ferros fundidos especiais, os resistentes à corrosão constituem um dos grupos mais importantes [4].

Como se sabe, a corrosão dos metais, na presença de soluções contendo oxigênio, é um processo eletroquímico. O resultado de corrosão é a "ferrugem". Quando se trata de alta pureza, com superfície, extremamente uniforme, a presença de quantidade suficiente de oxigênio, origina óxido de ferro hidratado que é a forma menos solúvel de óxido de ferro. Se no ponto de ataque, ocorrer forte aderência da ferrugem, por ausência de movimento, por exemplo, é possível que o ataque cesse. No entanto, normalmente há muitos pontos na superfície da peça onde o comportamento é diferente. Essa diferença de comportamento pode ocorrer também no meio circunvizinho. Como este é, em geral, condutor de eletricidade ou "eletrolito", cria-se uma diferença de potencial entre os vários pontos de comportamento diferente; resultam células galvânicas, entre anodos locais e catodos nas superfície do metal, provocando a continuidade da corrosão.

No ferro fundido cinzento, admite-se que a grafita seja um fator determinante no progresso e distribuição da corrosão. A grafita é insolúvel na maioria dos meios corrosivos; entretanto, em certos meios, como



determinados ácidos fortes, o ataque da matriz é acelerado pela célula galvânica criada entre a grafita e o ferro, desde que a estrutura do ferro fundido e a distribuição das partículas sejam tais que permitam a infiltração dos constituintes corrosivos no corpo do material.

A melhor prática para evitar esse fenômeno consiste na produção de uma matriz austenítica, mediante a introdução de quantidades suficientes de níquel e cobre. A matriz austenítica é mais resistente ao ataque químico e menos ativa na sua reação galvânica como a grafita.

O cromo é outro elemento muito eficiente sob o ponto de vista de conferir resistência à corrosão aos ferros cinzentos. Em teores de 20 a 35%, apresentou bons resultados na presença de ácido oxidante, sobretudo nítrico, numerosas soluções salinas, soluções orgânicas ácidas e para exposição à atmosfera.

Do mesmo modo o silício adicionado em teores de 14,5% ou mais, confere aos ferros fundidos elevadas resistência ao ácido sulfúrico fervente a 30% de concentração; com 16,5% de Si, os ferros fundidos apresentam boa resistência à corrosão na presença de ácidos nítrico e sulfúrico ferventes, de praticamente todas as concentrações.

Esses elementos, Si, Cr, Ni e Cu originam os chamados ferros fundidos resistentes à corrosão, cujos tipos mais importantes, com respectivas propriedades



estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição e propriedades de ferros fundidos resistentes à corrosão [4].

	Alto silício	Alto cromo	Alto níquel
Carbono total	0,4-1,1	1,2-4,0	3,0
Manganês	1,5	0,3-1,5	0,5-1,5
Fósforo	0,15	0,15	0,08
Enxofre	0,15	0,15	0,12
Silício	14-17	0,5-3,0	1,0-2,8
Níquel	—	5,0	13,5-36
Cromo	5,0	12-35	1,5-6,0
Molibdênio	1,0	4,0	1,0
Cobre	0,5	3,0	7,0
Estrutura da matriz do estado fundido	Ferrita	Martensita Austenita	Austenita
Dureza Brinell	480 a 520	250 a 740	130 a 250
Limite de Resistência a Tração, Kgf/mm ²	9,1 a 18,2	21,0 a 84,0	17,5 a 31,5
Resist. à Ruptura Transversal			
— carga, Kgf	545 a 1000	910 a 1590	820 a 1590
— deflexão, mm	0,65	1,5 a 3,8	5 a 25
Temperatura máxima de serviço, °C	—	815 a 1093	705 a 815

Os tipos de alto silício - entre os quais o Duriron - aproximam-se mais dos aços do que dos ferros fundidos. Acima de 14,2% de silício, a resistência à corrosão em ácido sulfúrico em ebulição é muito grande. Com adição de cromo e molibdênio e silício em torno de 17%, apresentam boa resistência à corrosão pela ação do ácido clorídrico. Resistem igualmente a soluções de ácidos orgânicos a



quaisquer concentrações ou temperaturas.

As propriedades mecânicas não são boas: são ligas duras e quebradiças; difíceis de fundir e de usinabilidade praticamente nula. Esses materiais são usados em tubos de drenagem de indústrias químicas, laboratórios, hospitais, etc..

Na indústria de fertilizantes e de explosivos, utiliza-se esses materiais para torres, tubos e dispositivos para concentração de ácidos sulfúrico e nítrico. Empregam-se ainda em bombas, válvulas, bocais, para descarga de tanques, etc., de equipamentos para manuseio de substâncias corrosivas como ácido crômico, lamas e outras substâncias corrosivas típicas de fábricas de papel e celulose, pigmentos, etc..

Os materiais de alto teor de cromo, entre 20 a 35% apresentam boa resistência à ação de ácidos oxidantes, como o nítrico, mas não resistem à ação de ácidos redutores.

Suas aplicações podem também ser feitas em ácidos fracos, sob condições oxidantes, em soluções salinas, em soluções ácidas orgânicas e atmosferas marítimas e industriais.

A aplicação desses materiais é, em consequência, feita nos seguintes casos: as composições de alto cromo e baixo carbono, em potes de fusão de chumbo, zinco ou alumínio e outras peças expostas a elevadas temperaturas. Nos teores mais elevados de cromo, na indústria de papel



onde haja licores de branqueamento de hipocloreto, sulfato de alumínio (até 5% de concentração), ácido fosfórico (em concentrações até 60%, a temperaturas até 80°C), etc..

Apresentam, finalmente, melhores propriedades mecânicas que as de alto silício. Também são resistentes ao choque e podem ser usinados.

Os tipos de alto níquel constituem os conhecidos ferros fundidos austeníticos chamados Ni-Resit, empregados pela sua elevada resistência à corrosão. Suas propriedades e empregos são função das várias composições segundo as quais são produzidos.

As classes de alto níquel e cobre resistem bem a ácidos ligeiramente oxidantes, como ácidos sulfúricos, diluído ou concentrado, à temperatura ambiente. São também razoavelmente resistentes ao ácido clorídrico e alguns fosfóricos, a temperaturas ligeiramente elevadas. Com 18% ou mais de níquel são praticamente imunes à ação de álcalis ou cáusticos ou fracos ou fortes.

São os mais tenazes entre os ferros fundidos resistentes à corrosão. Apresentam ainda usinabilidade muito boa.

Outro grupo de ferros fundidos cinzentos especiais compreende os ferros fundidos resistentes ao calor.

O que se procura nessas ligas é resistência ao crescimento pelo calor, resistência à oxidação a altas temperaturas, resistência ao choque térmico, resistência



à fluência e limite de fadiga adequada a altas temperaturas.

O "crescimento" corresponde ao permanente aumento de volume que ocorre no ferro fundido quando exposto longamente a temperaturas elevadas ou a ciclos repetidos de aquecimento e esfriamento. Esse fenômeno resulta da expansão pela grafitação, expansão e contração a temperaturas de transformação e oxidação interna do ferro. Por outro lado, gases podem se introduzir na superfície do ferro fundido a altas temperaturas nos locais correspondentes aos veios de grafita e oxidá-la, assim como o ferro e o silício.

O silício, que em teores até cerca de 3,5% aumenta a velocidade de crescimento, devido sua tendência de grafitação, acima de 4% retarda o fenômeno.

O cromo, que é elemento estabilizador de carbonetos, retarda a tendência ao crescimento do ferro fundido, quando utilizado a temperaturas de 455° C ou superiores.

O silício e o cromo aumentam ainda a resistência à formação de casca de óxido, pois formam uma camada superficial fina de óxido, a qual é impermeável às atmosferas oxidantes.

O níquel atua sobretudo no sentido de melhorar a resistência e a tenacidade a temperaturas elevadas. O molibdênio atua do mesmo modo.



Usam-se também adições de alumínio que reduzem o crescimento e a tendência à formação de casca de óxido. Esse elemento, entretanto, afeta negativamente as propriedades mecânicas do material à temperatura ambiente.

A Tabela 4 mostra algumas composições e propriedades mecânicas de ferros fundidos resistentes ao calor.

Tabela 4 - Faixa de composição e propriedades mecânicas de ferros fundidos resistentes ao calor [4].

(%)	De médio silício	De alto cromo	De alto níquel	Ao Ni-Cr-Si	Ao alumínio
Carbono	1,6-2,5	1,8-3,0	1,8-3,0	1,8-2,6	1,3-2,0
Silício	4,0-7,0	0,5-2,5	1,0-2,75	5,0-6,0	1,3-6,0
Manganês	0,4-0,8	0,3-1,5	0,4-1,5	0,4-1,0	0,4-1,0
Níquel	—	5,0	13,5-36,0	13,0-43,0	—
Cromo	—	15,0-35,0	1,8-6,0	1,8-5,5	—
Cobre	—	—	7,0 max.	10,0 max.	—
Molibdênio	—	—	1,0 max.	1,0 max.	—
Alumínio	—	—	—	—	20,0-25,0
Estrutura da matriz no estado fundido	Ferrita	Ferrita Perlita grosseira	Austenita	Austenita	Ferrita
Limite resist. tração Kgf/mm ²	17,5-31,5	21-63	17,5-31,5	14,0-31,5	24-63
Dureza Brinell	170-250	250-500	130-250	110-210	180-350
Resist. à ruptura transversal					
— carga, kgf	450-1090	900-1560	820-1360	820-1130	—
— flecha, mm	4,5-9,0	1,5-3,8	5,1-25,0	7,5-35,5	—
Resist. ao choque, Kgf.m	2-3,3	2,8-4,8	8,3-20,7	11,0-20,7	—

As ligas de médio silício apresentam boa resistência à formação de casca de óxido e ao crescimento. Como o silício aumenta também a temperatura de transformação



para cerca de 900° C, a faixa de temperatura dessas ligas é igualmente elevada. São um tanto frágeis.

As ligas de alto cromo são largamente usadas devido à ação estabilizadora de carbonetos, que impede o crescimento e porque apresentam a tendência de formar um óxido superficial protetor. Por isso, podem ser empregados em temperaturas da ordem de 1000° C e mesmo 1100° C sob condições atmosférica e na presença de alguns reagentes químicos.

As de alto níquel são do tipo austenítico, conhecidas como Ni-Resist, já comentadas. Apresentam boa resistência à formação de casca de óxido e crescimento até temperaturas de 815° C na maioria das atmosferas oxidantes e bom comportamento sob a ação do vapor, até cerca de 530° C.

Os ferros fundidos ao Ni-Cr-Si podem ser usados até temperaturas da ordem de 950° C. Tanto os de alto níquel como os Ni-Cr-Si têm excelente tenacidade e elevada resistência ao choque, como pode-se verificar pela Tabela 4.

Finalmente os ferros fundidos ao alumínio, apesar de sua boa resistência à tendência de formação de casca de óxidos, têm pequeno uso comercial, devido à sua fragilidade e dificuldade na fusão [4].

Sendo o ferro silício o material alvo desta pesquisa, reserva-se um capítulo específico a ele, que é apresentado a seguir.



CAPÍTULO III

3. FERRO-SILÍCIO

3.1. Introdução

Os ferros fundidos de alto silício, extensivamente empregados nas indústrias químicas, representam uma liga de ferro contendo entre 14% e 16% de silício, além de pequenas quantidades de outros elementos tais como carbono, manganês, fósforo, enxofre, níquel e molibdênio.

Atribui-se sua descoberta, em 1908 ao metalurgista francês JOUVE; suas propriedades e processos de fundição foram depois estudados por Rossi, na Itália, e outros.

A Lennox Foundry, de Londres, talvez tenha tido a primazia na fabricação em escala industrial de peças de alto teor de silício; as peças que apareceram em 1912 nos USA, sob a marca "DURIRON", eram fundidas com gusa provindo de Londres, com 15% de silício [6].

Dentre as ligas de ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de fundamental importância para a indústria, não só devido às características inerentes ao próprio material como também pelo fato de, mediante introdução de elementos de liga, aplicação de tratamentos térmicos adequados, usinabilidade definida e o desenvolvimento de processos de soldagem, torna viável o seu emprego em aplicações que, de certo modo, eram



exclusivas dos aços ou de alguns não ferrosos [4].

O silício é um elemento que faz parte da composição química de todo ferro fundido; entretanto, são chamados de ferros fundidos ligados ao silício, apenas aqueles nos quais este elemento encontra-se em teores superiores a 5%. Quando a porcentagem de silício está entre 5 e 8% tem-se ferros fundidos com boa refratariedade e quando os teores estão entre 12 e 18% tem-se os ferros fundidos resistentes à corrosão em certos meios líquidos e gasosos [5].

O desenvolvimento deste estudo procura conduzir as informações e o conhecimento científico para as ligas de ferro fundido com alto teor de silício, visando o seu emprego em meios corrosivos.

3.2. Composição Química do Ferro-Silício

A Tabela 5 [6], apresenta as principais marcas comerciais com respectivas composições químicas médias das ligas de ferro com alto silício comerciais, inclusive três ligas produzidas no Brasil pela ELECTRO AÇO ALTONA (EA) sob licença do RHEINHÜTTE do Brasil.



Tabela 5 - Ferros fundidos de alto silício; marcas comerciais e composições químicas em %.

Marca	Si	Ct	P	S	Mn	Ni	Cu	Cr	Mo
Hypersilid.....	14,50	0,65	0,15	0,02	0,05	0,25	0,01	—	—
Duriron.....	14,75	0,85	0,12	0,03	0,66	—	0,50	0,50	—
Corrosiron.....	14,60	0,95	0,08	0,04	0,37	—	—	—	—
Tantiron.....	15,00	0,70	0,20	0,05	0,30	—	—	—	—
Ironac.....	15,00	0,80	0,85	0,05	0,40	0,05	0,03	—	—
EA-10. I. 14.....	15,00	0,70	0,05	0,04	0,65	—	0,80	—	—
EA-10. I. 15.....	14,90	0,70	0,05	0,04	—	—	0,70	—	2,5
EA-10. I. 16.....	14,90	0,85	0,03	0,04	0,65	—	0,70	5,25	—

A Tabela 5 mostra os ferros fundidos de mais acentuada resistência aos ácidos fortes, com 14 a 16% de silício. Dentro dessa faixa, os ferros apresentam boas propriedades mecânicas e ótima resistência à corrosão. A adição de outros elementos de liga podem melhorar ainda mais outras propriedades conforme citado no item anterior.

3.3. Propriedades Físicas e Mecânicas do Ferro com Alto Silício



As propriedades físicas e mecânicas do ferro com alto silício são variáveis de acordo com o teor de silício e outros elementos presentes na liga [6].

Dados médios são apresentados a seguir:

Peso específico:	6,9 a 7,1 g/cm ³ ;
Ponto de fusão:	1200 a 1350 °C;
Calor específico:	540 J/kg.K;
Coeficiente de expansão térmica:	12×10^{-6} mm/mm.°C;
Condutividade térmica:	29 a 36,5 W/m.K;
Resistividade elétrica:	0,5 a 0,9 Ohm mm ² /m;
Dureza:	450 a 500 HB;
Resistência à tração:	98 a 147 MPa;
Resistência à compressão:	390 a 400 MPa;
Módulo de elasticidade:	140280 MPa;
Resistência ao impacto:	4 a 9 MPa.

Peso específico:

Peso específico diminui com a elevação do conteúdo de Si (2,33 g/cm³); os ferros-silícios resistentes aos ácidos são mais leves que os ferros cinzentos.

Ponto de fusão:

Cerca de 50°C mais alto que um ferro típico para a mesma finalidade, devido ao teor mais baixo de carbono. Possuem também uma capacidade de absorver calor maior que os ferros cinzentos, porém seu calor específico não é mais alto que o dos produtos cerâmicos.



A expansão mantém-se mais ou menos regular em torno de 1000°C , não havendo aí as anormalidades que são ocasionadas por mudanças de fase no metal. A velocidade de expansão vai aumentando gradualmente com a elevação de temperatura; o coeficiente médio de expansão varia de $12,1 \times 10^{-6}$ (a 20°C) até $16,5 \times 10^{-6}$ (a 700°C), sendo que, em torno de 1000°C , mantém-se mais ou menos regular devido à inexistência de anormalidades causadas pelas mudanças de fase.

Condutividade térmica:

A adição de silício ao ferro fundido baixa sua condutividade térmica e, em termos de comparação, o ferro fundido resistente à corrosão ácida apresenta uma condutividade de $0,078 \text{ cal/cm/seg}$, enquanto que um ferro fundido cinzento comum apresenta $0,110 \text{ cal/cm/seg}$, em temperaturas variando de 0 a 200°C .

A condutividade elétrica desses ferros fundidos ao silício é também mais baixa que os ferros comuns, em cerca de 10%.

Dureza:

Os valores cotados para os ferros de alto silício, mostram a tendência de se apresentarem mais baixos que a dureza intrínseca (real) da liga, devido à micro porosidade comumente presente e oriunda de chupagens e gases internamente retidos. Uma média de dureza típica, de peças comerciais é de 450 HB, porém a dureza Brinell de um lingote, cuidadosamente desgaseificado, fundido a



vácuo, em fornos de alta frequência e resfriados lentamente, é de 520 Brinell.

Resistência e módulo de elasticidade:

A dureza dos ferros fundidos de alto silício, afeta os resultados de resistência à tração, causando erros devido à dificuldade de assegurar um alinhamento perfeito nas garras da máquina; a resistência média desses ferros fundidos é da ordem 15,75 kgf/mm², sendo de cerca da metade a um terço das atingidas pelos ferros cinzentos comuns. Os ensaios de resistência transversal, podem ser executados em barras de secção circular ou quadrado e dão resultados bem precisos. Um valor médio típico é de 28,35 kgf/mm². O módulo de elasticidade pode ser medido por observações de carga-deflexão, em barras sob solicitação de carga transversal, dando resultados representativos médios de cerca de 1,19 kgf/mm² x 10E4, para um módulo de elasticidade de ferro fundido cinzento, tomado como comparação e feito pelo mesmo método de 1,33 kgf/mm² x 10E4 [6].

3.4. Microestruturas dos Ferros Fundidos com Alto Silício

A microestrutura dos ferros com alto silício, como se prevê pelo diagrama binário Fe-Si, deve apresentar uma única fase constituída de uma solução sólida de silício na ferrita, ou seja uma fase alfa ou silício-ferrita,



conforme a Fig. 5. O carbono na liga apresenta-se na forma de grafita que, como já foi referido pode ser em flocos, de tamanhos variados, ou finalmente dividida, do tipo reticular, normalmente classificada como grafita de superesfriamento, ou seja ainda, na forma acicular ou em bastonetes, conforme ilustrados respectivamente nas Fig. 6 e Fig. 7.

No caso de ligas de carbono relativamente mais alto (que o normal), durante a solidificação, a grafita em excesso sobrenada a superfície do metal líquido na forma de "Kis", "Kis é uma concentração de grafita, que pode-se dar não só nesses ferros de alto silício, como em ferros de alto carbono. Resulta num ponto escuro no campo da micro ou da macrografia, segundo o tamanho do "Kis". São fenômenos de resfriamentos, que redundam numa concentração de carbono", aliás como apontado na Fig. 14 (diagrama de equilíbrio). Com teores menores, tal separação não se dá.

Os ferros fundidos em questão, podem apresentar uma segunda fase cujo exemplo típico é apresentado na Fig. 8; tem a aparência de cementita, distribuindo-se ao acaso, no sentido da espessura da peça. Essa fase, como foi mencionado no item de tratamento térmico, desaparece por um recozimento a 800°C , durante 1-2 horas.





Fig. 5 - Micrografia de ferro fundido de alto silício, apresenta a fase alfa, (de silício-ferrita) e grafita em flocos, (120x) [6].

Um resfriamento rápido, através da faixa de variação de solidificação, parece contribuir para o aumento dessa fase-caboneto.

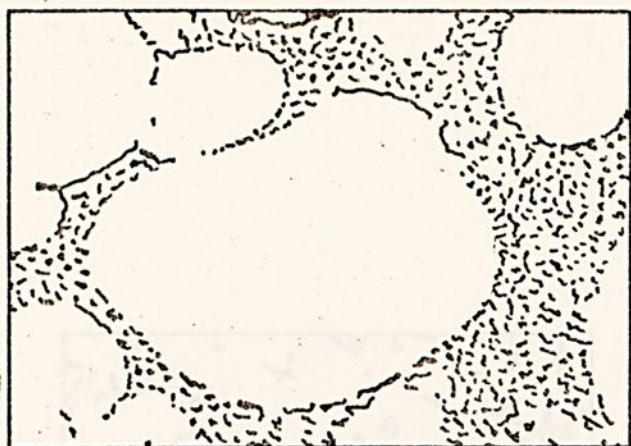


Fig. 6 - Micrografia de ferro de alto silício ilustrando o tipo de grafita reticular, (600x) [6].

A Fig. 9 ilustra um ferro fundido com 17% de silício, apresentando uma estrutura dupla.

Os ferros fundidos contendo alto teor de fósforo, mostram ainda uma terceira fase-fosfeto, que, como já foi referido, não é decomposta pelo tratamento térmico e é ilustrada na Fig. 10.

Devido à dificuldade de se atacar, metalograficamente esse carboneto, pelo reagente normal empregado para o ataque de cementita, ou seja, a picrato de sódio a quente, a literatura refere-se a um método de identificação destes, por meio de análise química, desde que um recozimento os decompõe em grafita, a qual pode ser facilmente avaliada pela análise.

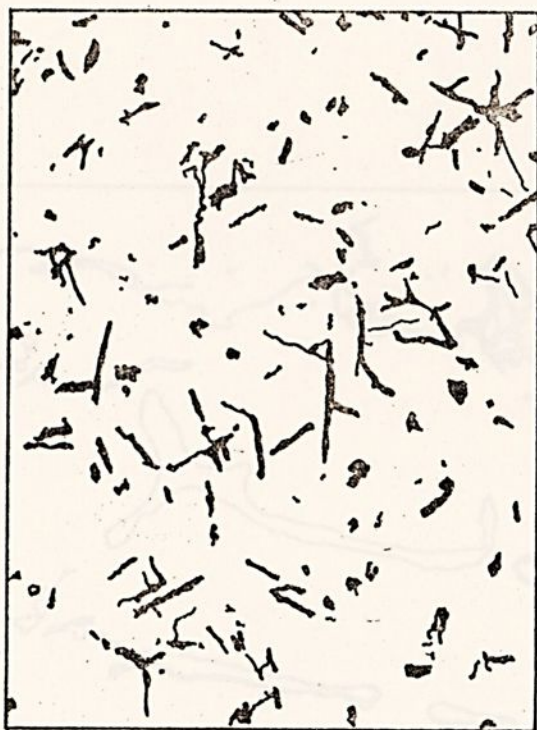


Fig. 7 - Micrografia de um ferro de alto silício mostrando o tipo de grafita acicular, ou de bastonetes, (120x) [6].

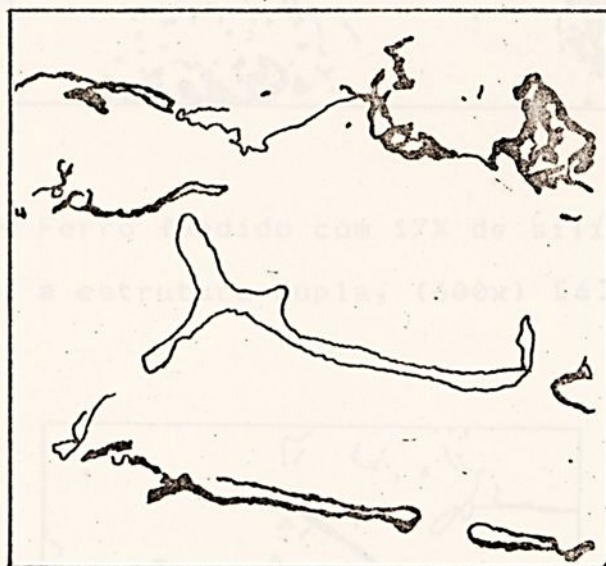


Fig. 8 - Exemplo de uma segunda fase, carboneto, num ferro de alto silício; tem aparência de cementita e se distribui ao acaso na espessura da peça. É removível por tratamento térmico, (600x) [6].

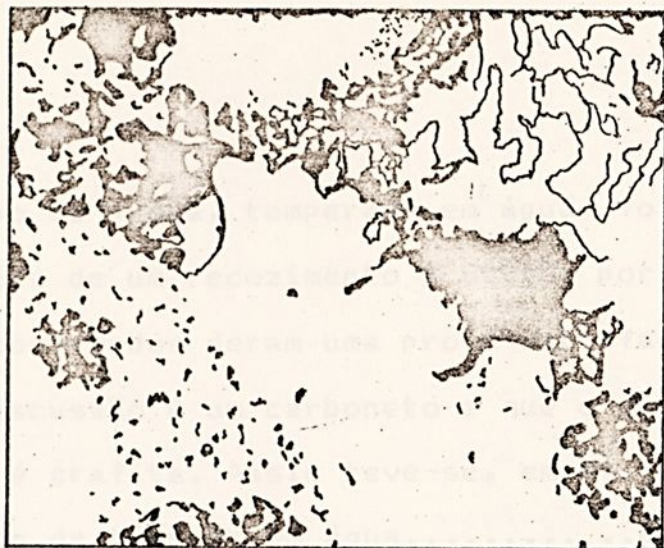


Fig. 9 - Ferro fundido com 17% de silício, mostrando a estrutura dupla, (600x) [6].

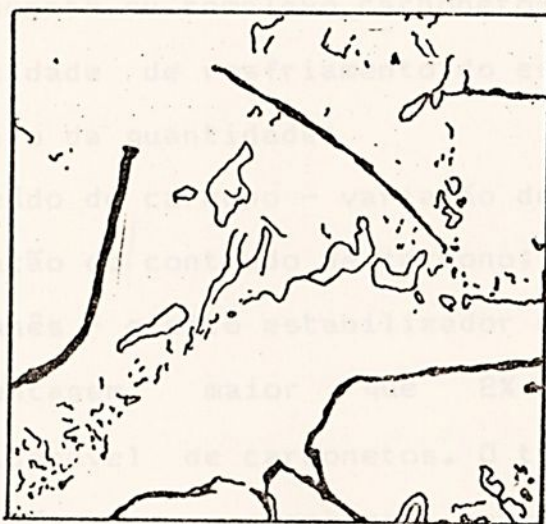


Fig. 10 - Micrografia num ferro fundido contendo alto teor de fósforo, mostrando uma terceira fase, a de um fosfeto, (1500x) [6].

Um corpo de prova, temperado em água, foi analisado antes e depois de um recozimento a 800°C , por 2 horas, os resultados observados deram uma prova satisfatória de que a fase em discussão é um carboneto e que o produto de sua decomposição é grafita. Assim teve-se, em %:

Ct. antes da têmpera em água.....0,50;

Cg. antes da têmpera em água.....0,12;

Cg. depois do recozimento.....0,47.

Como já mencionado e resumindo, têm-se as seguintes variáveis que influem na quantidade e distribuição da fase tipo carboneto ou complexo carboneto-fosfeto;

- a) Velocidade de resfriamento do estado líquido - aumento da quantidade;
- b) Conteúdo de carbono - variação de quantidade com variação do conteúdo de carbono;
- c) Manganês - efeito estabilizador de carboneto - em porcentagem maior que 2% produz aumento considerável de carbonetos. O tratamento térmico decompõe os carbonetos remanescendo fosfeto estável;
- d) Fósforo - estabilizador de carboneto - forma mistura eutética complexa de carboneto-fosfeto. O tratamento térmico decompõe os carbonetos remanescendo os fosfetos indecomponíveis;



- e) Molibdênio - estabiliza os carbonetos;
- f) Níquel - diminui a estabilidade dos carbonetos [6].

3.5. Resistência à Corrosão

O grau de resistência à corrosão das ligas ferro-silício varia de acordo como o seu conteúdo de silício; atinge altos valores com porcentagens de silício de 13%. Como padrão de referência, ao se comparar a resistência à corrosão desses ferros fundidos tem sido normal aceitar como limite de corrosão tolerável, uma penetração em ácido de 0,10 mm/ano. Se o ataque for maior, o material é considerado impróprio.

3.5.1. Ácido Sulfúrico

Com cerca de 14,5% de silício, as ligas ferro-silício, têm suficiente resistência à corrosão ao ácido sulfúrico em todas as concentrações e sob todas as temperaturas até o ponto de ebulição normal da solução ácida.

O maior ataque é constatado com soluções à ebulição, contendo de 20-30% de H_2SO_4 , por peso. O aumento de corrosão do ferro-silício resistente a ácido concentrado, é nulo até mesmo a $250^\circ C$. A frio o efeito do ácido sulfúrico é menor que em temperaturas elevadas.



Com todas as soluções de ácido sulfúrico, a proporção inicial de ataque vai se reduzindo consideravelmente e assume um nível baixo e estável depois de um período de várias semanas.

3.5.2. Ácido Nítrico

Com este ácido, a velocidade de ataque não é tão apreciavelmente menor, no tempo, quanto para o ácido sulfúrico.

O teor silício requerido para obter uma liga não afetada pelo HNO_3 deve ser mais do que 14%. O maior ataque ocorre com soluções de ácido fraco (v.g. 5% no ponto de ebulição) e a velocidade de corrosão diminui com soluções de maior concentração, até que é atingido o limite de segurança de 0,1 mm/ano, de penetração, com uma solução concentrada de 50%, por peso.

Para uma completa resistência a soluções contendo mais que 50% as composições normais desses ferros fundidos são satisfatórias. O ácido nítrico, em qualquer concentração, à temperatura normal ambiente, tem ação desprezível sobre os ferros normais com 14,5% de silício.

3.5.3. Ácido Clorídrico



A resistência dos ferros-silício, de composição usual, não é tão completa para ácido clorídrico quanto para ácidos sulfúrico e nítrico.

O ataque de soluções, em todas as concentrações, a frio, é fraca, mas a temperaturas elevadas, especialmente para soluções entre 20-30%, é rápida. Deve-se elevar substancialmente o teor de silício para cerca de 17%. Essa elevação corresponde, em efeito, praticamente, à mesma que é obtida pela introdução de 3,5% a 4% de molibdênio em ferros de 14,5% de silício. Esse tipo de ferro ao silício é aplicado em quase todas as operações com ácido clorídrico.

3.5.4. Ácido Fosfórico

A temperatura ambiente, o ataque pela imersão desses ferros fundidos em soluções diluídas ou concentradas, é desprezível.

A temperaturas elevadas (v.g., no ponto de ebulição), o ataque mantém-se baixo, na mesma proporção que um ácido sulfúrico de 20%; sob tais condições (0,1 mm de penetração/ano) os ferro fundidos ao silício, de teor não inferior a 14,5% de silício, podem ser aplicados para ácidos fosfórico, em todas as concentrações, até 300°C [20].



3.6. Resistência aos Ácidos, Sais e suas Misturas

É difícil de se estabelecer uma lista completa, onde as mais variadas condições de corrosão industrial possam ser encontradas; em muitos casos, os ferros fundidos de alto silício ainda não foram aplicados.

Até onde se conhece, as tabelas seguintes, resumem as mais divulgadas. Nessas tabelas [6-8], o grau de ataque é simbolizado por letras, com os seguintes significados próprios:

A= Inatacado (perda por corrosão menor que $0,00001$ g/cm.2/hora);

B= Ataque muito leve (perda por corrosão entre $0,00001-0,0001$ g/cm.2/hora);

C= Algum ataque (perda por corrosão entre $0,0001-0,001$ g/cm.2/hora);

D= Ataque definido (maior que $0,001$ g/cm.2/hora).

A Duriron [8] apresenta nas Fig. 11, 12 e 13, casos específicos de resistência a corrosão aos ácidos sulfúrico e nítrico.



Tabela 6 - Resistência aos ácidos.

Ácido	Concentração	Temperatura	Grau de ataque
Acético	Solução 0,5 %	P.Eb. (*)	A
Acético	Solução 20 %	P.Eb.	A
Acético	Solução 25 %	15°C	A
Acético	Solução 80 %	P.Eb.	A
Acético	Puro 100 %	15°C	A
Acético	Puro 100 %	P.Eb.	A
Acético (Éter)	Puro	P.Eb.	A
Acético (anidrido) ..	Puro	15°C	A
Bórico	Solução 25 %	P.Eb.	A
Cátrico	Solução 10 %	15°C	A
Clorídrico	Solução 5 %	15°C	A
Clorídrico	Solução 5 %	90°C	A
Clorídrico	Solução 35 %	15°C	B
Clorídrico	Solução 35 %	90°C	C
Clorídrico	Solução 35 %	P.Eb.	D
Clorosulfônico	Concentrado	15°C — 70°C	A
Crômico	Solução 5 %	15°C	A
Crômico	Solução 50 %	15°C	A
Crômico	Solução 50 %	P.Eb.	B
Fosfórico	Em todas concentr.	15°C — P.Eb.	A
Fluorídrico	Solução 70 %	15°C	D
Gálico	Solução 10 %	P.Eb.	A
Hidrobromico	Solução 10 %	15°C	A
Hidrobromico	Densidade 1,45	15°C	B
Hidrobromico	Densidade 1,45	P.Eb.	D
Nítrico	Sol. acima 50 %	P.Eb.	A
Nítrico	Em todas concentr.	15°C	A
Nítrico	Sol. abaixo 50 %	P.Eb.	B
Oxídrico	Solução 20 %	15°C e P.Eb.	A
Oleum	+ 20 % de SO ₃	80°C — 100°C	C
Pícrico	Sol. sat. em álcool	15°C	B
Sulfúrico	Em todas concentr.	15°C — P.Eb.	A
Sulfuroso	Solução saturada	15°C	A
Tartárico	Solução 25 %	15°C — P.Eb.	A

* P.Eb. = Ponto de ebulição.



Tabela 7 - Resistência à mistura de ácidos.

Ácidos misturados	Concentração	Temperatura	Grau de ataque
Acético e butírico	Concentrado	P.Eb.	B
Clorídrico e sulfúrico	10% HCl + 20% H ₂ SO ₄	70°C	A
Nítrico e sulfúrico	Todas as misturas	15°C — 120°C	A
Fosfórico e sulfúrico	15% de H ₂ SO ₄	110°C	B

Tabela 8 - Resistência aos álcalis.

Álcali	Concentração	Temperatura	Grau de ataque
Amônio (hidróxido)	Solução saturada	15°C	A
Potássio (hidróxido)	Solução 50 %	15°C	A
Potássio (hidróxido)	Solução 50 %	130°C	B
Potássio (hidróxido)	Fundido	360°C	D
Sódio (carbonato)	Fundido	900°C	D
Sódio (hidróxido)	Solução 30 %	15°C	A
Sódio (hidróxido)	Solução 30 %	120°C	B
Sódio (hidróxido)	Fundido	318°C	D



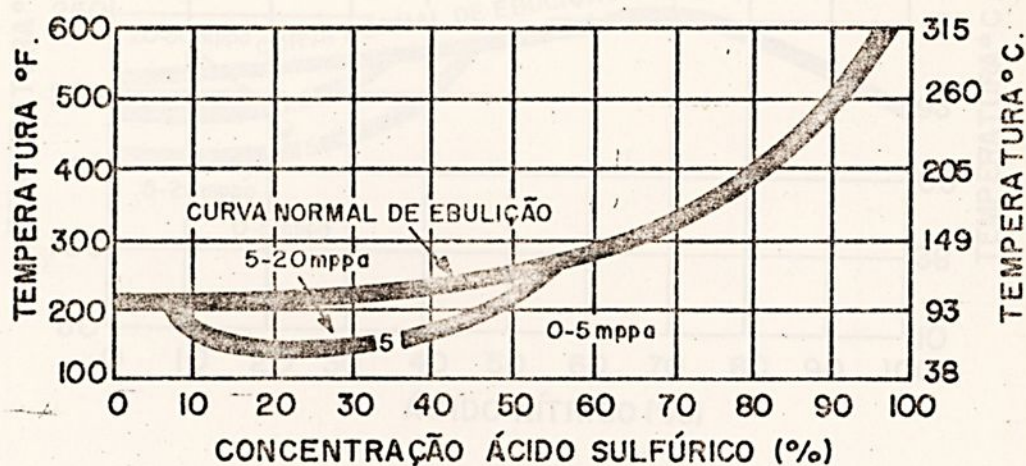


Fig. 11 - Resistência do Duriron ao ácido sulfúrico.

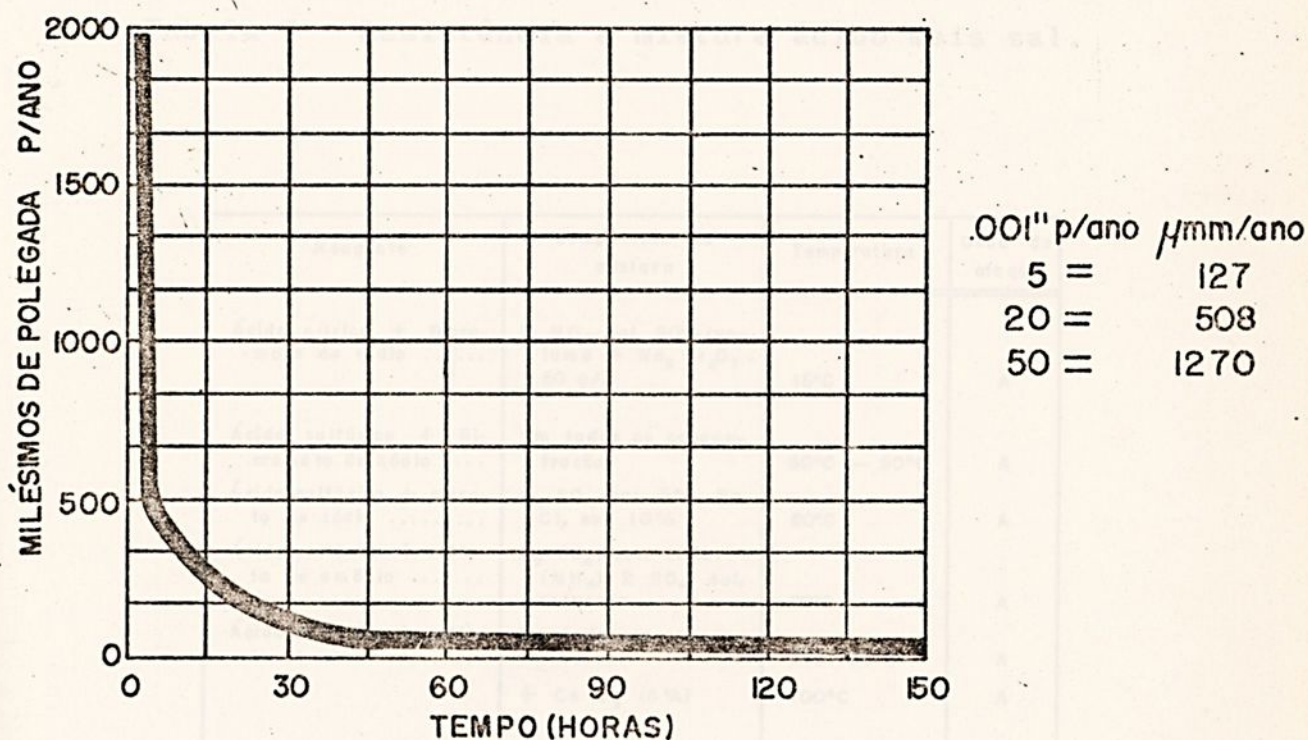


Fig. 12 - Taxa de corrosão do Duriron em ácido sulfúrico a 30°C.

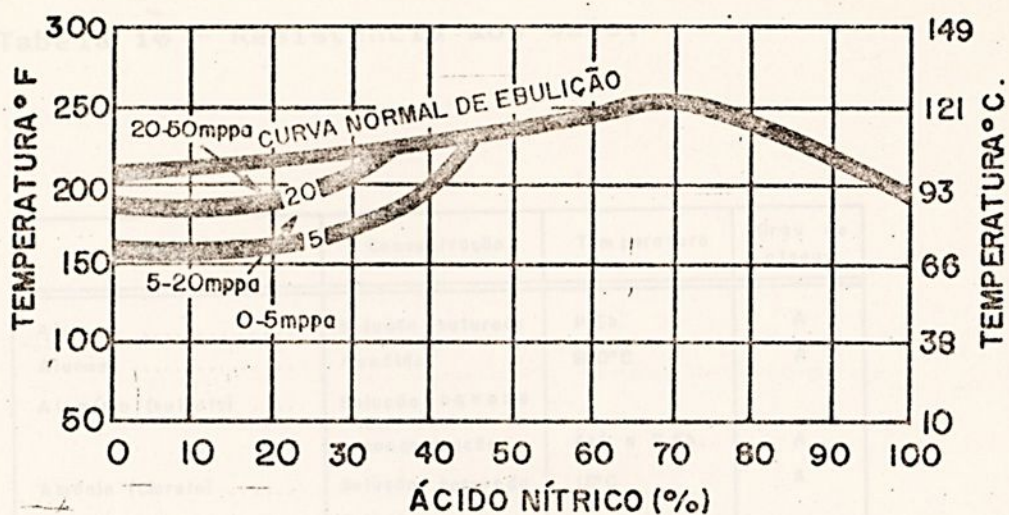


Fig. 13 - Taxa de corrosão do Duriron ao ácido nítrico.

Tabela 9 - Resistência a mistura ácido mais sal.

Reagente	Composição da mistura	Temperatura	Grau de ataque
Ácido nítrico + Bicromato de sódio	H NO ₃ , sol. 20%/volume + Na ₂ Cr ₂ O ₇ ; 50 g/lit	15°C	A
Ácido sulfúrico + Bicromato de sódio	Em todas as concentrações	60°C — 90°C	A
Ácido sulfúrico + clorato de sódio	H ₂ SO ₄ , sol. 5%; Na Cl, sol. 10%	50°C	A
Ácido sulfúrico + sulfato de amônio	H ₂ SO ₄ , sol. 10%; (NH ₄) ₂ SO ₄ sol. saturada	70°C	A
Ácido sulfúrico + sulfato de cobre	Em todas as concentrações	Até 100°C	A
	+ Ca Cl ₂ (5%)	100°C	A
Ácido sulfúrico + sulfato de sódio	Em todas as concentrações	Até 100°C	A

Tabela 10 - Resistência aos sais.

Sai	Concentração	Temperatura	Grau de ataque
Alumem	Solução saturada	P.Eb.	A
Alumem	Fundido	200°C	A
Alumínio (sulfato)	Solução aquosa em todas as concentrações	Até o P.Eb.	A
Amônio (Cloreto)	Solução saturada	15°C	A
Amônio (cloreto)	Solução aquosa em todas as concentrações	Até o P.Eb.	A
Amônio (nitrato)	Solução saturada	Até o P.Eb.	A
Amônio (nitrato)	Sal puro fundido	Fusão	A
Amônio (sulfato)	Solução saturada	Até o P.Eb.	B
Amônio (persulfato) ..	Puro	P.Eb.	A
Cálcio (cloreto)	Densidade = 1,43	P.Eb.	B
Cálcio (hipoclorito) ...	Solução saturada	15°C	A
Cobre (sulfato)	Solução saturada	15°C — 100°C	A
Cobre (cloreto)	Solução 10%	P.Eb.	C
Cromo (alumem)	Solução saturada	P.Eb.	A
Ferrico (cloreto)	Solução 50%	50°C	D
Ferrico (sulfato)	Solução saturada	15°C	A
Manganês (cloreto) ...	Solução 1%	15°C	A
Manganês (cloreto) ...	Solução saturada	P.Eb.	B
Manganês (sulfato) ...	Solução 5%	15°C	A
Mercúrico (cloreto)	Solução saturada	20°C	A
Potássio (bitartarato) .	Solução saturada	P.Eb.	C
Potássio (clorato)	Solução saturada	P.Eb.	A
Potássio (cloreto)	Solução saturada	P.Eb.	A
Sódio (bisulfato)	Fundido	200°C	A
Sódio (cloreto)	Solução 20%	15°C	A
Sódio (hipoclorito)	Solução saturada	20°C	A
Sódio (sulfato)	Solução 10%	15°C	A
Zinco (cloreto)	Solução 30%	15°C	B
Zinco (cloreto)	Solução 30%	P.Eb.	D
Zinco (sulfato)	Solução 25%	20°C	A



Tabela 11 - Resistência a vários reagentes químicos.

Reagente	Composição	Temperatura	Grau de ataque
Alumínio, fundido	Alternância de úmido e seco -	Até 100°C	A
	Idem	700°C	D
	Condições atmosféricas	Normais	A
Bromo	Vapor úmido	15°C	B
	Líquido, puro	15°C	B
	Líquido, puro	70°C	D
Água de Bromo	Saturada	15°C	A
Cloro, gasoso	Puro	20°C	A
Água de Cloro	Saturada	15°C	A
Peróxido de Hidrogênio	20 volumes	15°C	A
lido	Gasoso	100°C	A
Fenol	Pureza 90%	P.Eb.	A
Água corrente	Aerada	15°C	A
Vapor	—	Até 300°C	A
Vapor + Oxigênio	5% de O ₂	100°C	A
Urina	Variaível	15°C	A
Vinagre	Concentr. comercial	15°C	A
Zinco fundido	—	500°C	D

Tabela 12 - Resistência à corrosão [7].

Material

Valor de durabilidade

A= G-X07Si 15

Ø = Boa durabilidade

B= G-X07SiMo 15,3

1 = durável sobre certas condições

C= G-X90SiCr 15,5

2 = Baixa durabilidade



Meio de Ataque	A	B	C
Acetaldeído	0	0	0
Acetanilida	0	0	0
Acetato de alumínio	0	0	0
Acetato de celulose	0	0	0
Acetato de chumbo	0	0	0
Acetato de cobre	0	0	0
Acetato de etila	0	0	0
Acetato de mercúrio	0	0	0
Acetato de sódio	0	0	0
Acetona	0	0	0
Ácido acético	1	0	0
Ácido anídrico ftálico	0	0	0
Ácido benzeno sulfônico	0	0	0
Ácido benzóico	0	0	0
Ácido bórico	0	0	0
Ácido bromídrico	2	1-2	1-2
Ácido butírico	0	0	0
Ácido cítrico	0	0	0
Ácido clorídrico	0-2	0-1	0-2
Ácido cloroacético (contendo HCl)	2	0-1	1-2
Ácido crômico	0	0	0
Ácido crômico-Ácido fluorídrico	2	2	2

Meio de Ataque	A	B	C
Ácido esteárico	0	0	0
Ácido fluorídrico	2	2	2
Ácido fluossilícico	2	2	2
Ácido fórmico	0	0	0
Ácido fosfórico (puro)	0	0	0
Ácido fosfórico (+ions Flúor)	2	2	2
Ácido ftálico	0	0	0
Ácido gálico	0	0	0
Ácido humico	0	0	0
Ácido láctico	0-1	0-1	0-1
Ácido maleico	0	0	0
Ácido málico	0	0	0
Ácido nítrico	0-1	0-1	0-1
Ácido oleico	0	0	0
Ácido oxálico	0	0	0
Ácido palmítico	0	0	0
Ácido perclórico	1	1	1
Ácido picrico	0-1	0-1	0-1
Ácido propiônico	0	0	0
Ácido prussico	0-1	0-1	0-1
Ácido salicílico	0	0	0
Ácido sulfocromo	1	1	1



Meio de Ataque	A	B	C
Ácido sulfúrico (0 à 99%)	0	0	0
Ácido sulfúrico (fumegante)	2	2	2
Ácido sulfuroso	2	2	2
Ácido tânico	0	0	0
Ácido tartárico	0	0	0
Ácido tricloroacético (contendo HCl)	1	0	1
Ácido graxos	0	0	0
Água clorada	1	0-1	0-1
Água de vidro	0-1	0-1	0-1
Água régia	0-2	0-2	0-1
Alcool	0	0	0
Alcool de terebentina	0	0	0
Alcool butílico	0	0	0
Aldeido metílico	0	0	0
Alúmem de cromo	0	0	0
Alúmem de ferro	0	0	0
Anidrido acético	1	0	0
Arsenito de cobre	0	0	0
Arsenito de sódio	0	0	0
Benzeno	0	0	0
Bifluoreto de amônio	2	2	2
Bisulfato de sódio	0	0	0

Meio de Ataque	A	B	C
Bisulfato de cálcio	2	2	2
Bisulfito de sódio	2	2	2
Bitartrato de potássio	0	0	0
Brometo de potássio	0	0	0
Cânfora	0	0	0
Carbonato de amônio	0	0	0
Carbonato de potássio	0	0	0
Cerveja	0	0	0
Cianeto de cobre	1	1	1
Cianeto de mercúrio	0-1	0-1	0-1
Cianeto de potássio	1	1	1
Citrato de sódio	0	0	0
Clorato de potássio	0	0	0
Cloreto de acetila	0-1	0	0-1
Cloreto de alumínio	1-2	1	1
Cloreto de amônio	1-2	1	1
Cloreto de bário	0-1	0	0
Cloreto de benzila	0	0	0
Cloreto de cádmio	0-1	0	0-1
Cloreto de cálcio	0	0	0
Cloreto de chumbo	0	0	0
Cloreto de cobre	2	1-2	1-2



Meio de Ataque	A	B	C
Cloreto de enxofre	0-1	0	0-1
Cloreto de etila	1	0	1
Cloreto de fósforo	1-2	1	1-2
Cloreto de hidrogênio	1-2	1	1-2
Cloreto de magnésio	0-1	0	0-1
Cloreto de mercúrio	1-2	1-2	1-2
Cloreto de níquel	2	1-2	1-2
Cloreto de potássio	0-1	0-1	0-1
Cloreto de sódio	0	0	0
Cloreto de zinco	0-1	0	0-1
Cloreto de estânico	0-1	0	0-1
Cloreto de estânico amônio	0-1	0	0-1
Cloreto estanoso	0-1	0	0-1
Cloreto manganoso	0	0	0
Clorofórmio	0	0	0
Cola	0	0	0
Combustível	0	0	0
Cresol	0	0	0
Cromato de sódio	0	0	0
Dicloroetileno	0-1	0	0-1
Difluoreto de potássio	2	2	2
Dióxido de cloro	2	2	0-1

Meio de Ataque	A	B	C
Dióxido de enxofre	2	2	2
Disulfeto de carbono	0	0	0
Enxofre	0	0	0
éter de petróleo	0	0	0
éter etílico	0	0	0
Ester ácido acético	0	0	0
Fenol	0	0	0
Flúor	2	2	2
Fluoreto de sódio	2	2	2
Formaldeído (formalina)	0	0	0
Fosfato de cálcio	0	0	0
Fosfato de ferro	0	0	0
Fosfato de sódio	0	0	0
Fosfato tricresílico	0	0	0
Gasolina	0	0	0
Glicerina	0	0	0
Glicol etílico	0	0	0
Hidrocarboneto	0	0	0
Hidróxido de bário	1	1	1
Hidróxido de cálcio	1	1	1
Hidróxido de potássio	1-2	1-2	1-2
Hidróxido de sódio	1-2	1-2	1-2

Meio de Ataque	A	B	C
Hipoclorito de sódio	1-2	1	0-1
Iodeto de potássio	0	0	0
Iodo	0-1	0-1	0-1
Iodoformio	0	0	0
Laca	0	0	0
Lisol	0	0	0
Mistura de ácidos($H_2SO_4+HNO_3+H_2O$)	0-1	0-1	0-1
Mistura de frutas(contendo SO_2)	1-2	1-2	1-2
Monocloreto de enxofre	0-1	0-1	0-1
Nitração acida	0	0	0
Nitração de alumínio	0	0	0
Nitrato de amônio	0	0	0
Nitrato de bário	0	0	0
Nitrato de chumbo	0	0	0
Nitrato de cobre	0	0	0
Nitrato de ferro	0	0	0
Nitrato de mercúrio	0	0	0
Nitrato de níquel	0	0	0
Nitrato de potássio	0	0	0
Nitrato de sódio	0	0	0
Nitrobenzeno	0	0	0
Nitrocelulose	0	0	0



Meio de Ataque	A	B	C
óleo	0	0	0
óleo de linhaça	0	0	0
óleos combustíveis	1-2	1-2	1-2
Oxalato de potássio	0	0	0
óxido de titânio(suspenso em H ₂ SO ₄)	0	0	0
Parafina	0	0	0
Perclorato de sódio	0	0	0
Permanganato de potássio	0	0	0
Peróxido de bário	1-2	1-2	1-2
Peróxido de hidrogênio	0	0	0
Peróxido de sódio	2	2	2
Persulfato de potássio	0	0	0
Petróleo	0	0	0
Petróleo (óleo cru)	0	0	0
Pirogalol	0	0	0
P3	1-2	1-2	1-2
Sais de Hartshorn	0	0	0
Sal amoníaco	0	0	0
Salmoura de resfriamento	0-1	0-1	0-1
Solução de açúcar	0	0	0
Solução de amônia	0	0	0
Sucos de fruta	0	0	0

Meio de Ataque	A	B	C
Sulfato de alumínio	0	0	0
Sulfato de amônio	0	0	0
Sulfato de cádmio	0	0	0
Sulfato de cálcio	0	0	0
Sulfato de cobre	0	0	0
Sulfato de chumbo	0	0	0
Sulfato de cromo	0	0	0
Sulfato de magnésio	0	0	0
Sulfato de níquel	0	0	0
Sulfato de potássio	0	0	0
Sulfato de quinina	0	0	0
Sulfato de sódio	0	0	0
Sulfato de titânio	0	0	0
Sulfato de zinco	0	0	0
Sulfato ferroso	0	0	0
Sulfeto de hidrogênio	0-1	0-1	0-1
Sulfeto de potássio	0-1	0-1	0-1
Sulfito de amônio	2	2	2
Sulfito de sódio	2	2	2
Tanina (ácido tânico)	0	0	0
Tartrato de sódio	0	0	0
Tetraborato de sódio (borax)	0	0	0



Meio de Ataque	A	B	C
Tetracloreto de carbono	0	0	0
Tintura de iodo	0	0	0
Tolueno	0	0	0
Tricloreto de arsênico	0	0	0
Tricloroetileno	0	0	0
Uréia	0	0	0
Vinho-vinagre	0	0	0
Vitriolo nitroso	0	0	0

3.7. Fundição de Peças em Ferro-Silício

Importância do conteúdo de:

Carbono

Os ferros fundidos de alto silício contêm carbono e, como no caso de ferros cinzentos, o conteúdo de carbono tem marcada influência nas propriedades de fundição da liga.

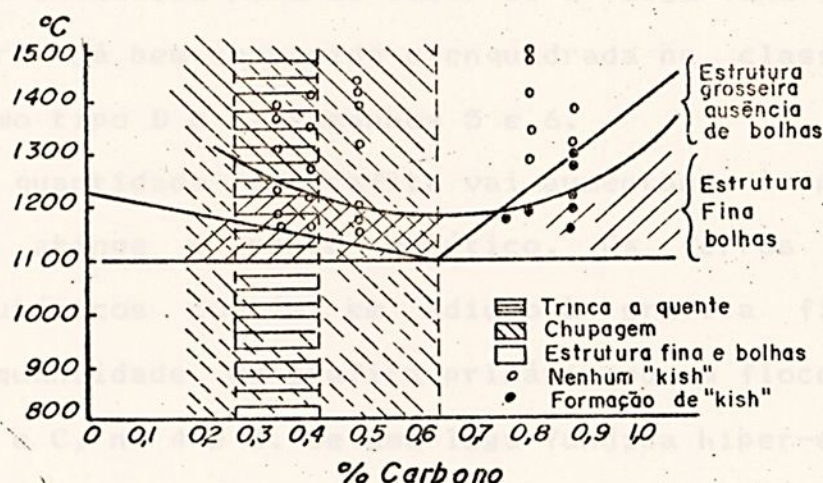


Fig. 14 - Diagrama de equilíbrio dos ferros fundidos de alto silício comercial; ligas contendo 15% Si e 0,65 Mn.

A presença de carbono no ferro-silício nos teores usuais, leva a liga ao ponto eutético. Dos resultados experimentais, na fundição foi estabelecido um diagrama de equilíbrio aproximado, que corresponde a uma secção plana de sistema ternário mais complexo, porém serve para indicar os resultados práticos de maior importância. A Fig. 14 apresenta tal diagrama.

Neste diagrama vê-se que as condições de equilíbrio alteram-se para um ferro contendo 15% de silício e 0,65 de manganês, numa faixa de conteúdo de carbono de 0,3% a 0,9%. A aparência da grafita, no ferro-silício representa uma boa indicação para se saber se a "liga fina", tipo de estrutura já bem conhecida e enquadrada na classificação ASTM como tipo D e E, tamanhos 5 e 6.

A quantidade de grafita vai aumentando à proporção que se atinge o ponto eutético. Os ferros fundidos hiper-eutéticos contém em adição à grafita fina, uma certa quantidade de grafita primária ou em flocos tipos ASTM B e C, nº 4 e 5. Se uma liga fundida hiper-eutética, for agitada enquanto esfria, separa-se um "Kis" e o restante do material apresentar-se-á mais baixo em carbono. Os flocos, de grafita, no ferro agitado, aparecem levemente menores, porém, foi observado que o teor de carbono, não ficou reduzido completamente ao valor eutético.

Com ligas desse conteúdo de silício e manganês, e com carbono entre 0,5%-0,6%, obtém-se uma maioria de peças "sãs" e com menor tendência a defeitos como trinca a quente ("hot tear"), etc. [6].

Manganês



Encontra-se nos ferros fundidos de alto silício usuais, em porcentagens que vão de 0,30% a 0,90%, do que não resulta separação de fase. Tem, entretanto, alguma influência na estabilidade de carbonetos e, um alto teor de manganês, produz um aumento gradual da quantidade de carboneto residual na liga que são porém, decompostos por tratamento térmico (recozimento). O manganês influi, outrossim, para a melhoria das propriedades mecânicas, sendo que o seu valor adequado é na ordem de 0,60%.

Fósforo

Apresenta-se na forma de área de fosfetos de ferro, associadas com a fase de carboneto residual (se presente); parece exercer uma influência estabilizadora neste último. A fase fosfeto, em contraste com a fase carboneto, sobrevive ao tratamento térmico (recozimento), o que será discutido no capítulo reservado ao tratamento térmico. Teores de fósforo até 1,4% não apresentam efeitos adversos sobre um ferro fundido com 15% de silício e 0,6% de carbono, mas desde que tem efeito estabilizador sobre os carbonetos, não se deve tê-lo nessa ordem.

Um valor adequado de fósforo é da ordem de 0,30%. Com teores maiores de 1,4% os ferros fundidos alto silício, começam a ficar acentuadamente mais quebradiços e apresentam um aumento no grau de microporosidade. A



fluidez do metal eleva-se levemente pela adição de fósforo, o que significa que as peças podem ser vazadas em temperaturas mais baixa.

Enxôfre-Cobre-Cromo

São encontrados normalmente como elementos residuais; nas porcentagens apresentadas, não têm influência apreciável nas propriedades dos ferros fundidos de alto silício.

Molibdênio-Níquel

Como já foi referido (item Resistência à corrosão em HCL), o molibdênio (cerca de 3,5%) eleva a resistência à corrosão, bem como melhora as propriedades mecânicas, a frio e quente, notadamente a resistência ao choque, destes ferros fundidos. O níquel, na base de 2% entra como refinador de grana, melhorando portanto as características mecânicas das peças [6].

3.7.1. Modelos de Projeto

Não é somente o conhecimento das características físicas e mecânicas da liga que dão ao projeto uma garantia de aplicação plena dos ferros fundidos de alto silício. É também necessário de se anotar certos dados



empíricos que vão sendo acumulados da prática. São estes dados relativos, empregados na fundição, que ditam, na maioria, as modificações que serão introduzidas no projeto e relacionadas com os detalhes mais importantes para melhor êxito da fundição.

A alta contração de solidificação do metal (cerca de 2%) e a sua fragilidade, devem sempre ser consideradas quando se projetam as peças. Deve-se, sempre que possível, evitar peças (como tubos, por exemplo) com grandes flanges em cada extremidade, que servem para reter a contração axial, livre. Outras vezes, a retenção, de contração se dá por um projeto errado de canais. O fator de maior importância, causador desse defeito que aliado a essa contração anormal, que é causada pelos moldes, machos e armações, é geralmente o projeto.

Podem ainda influir as tensões residuais que são causadas pela desmoldagem muito antecipada e consequente resfriamento rápido ao ar, sem a transferência, na temperatura certa, para o forno de tratamento térmico, como será indicado. Evita-se esse defeito, por meio do emprego de uma areia mais fraca, pelo imediato afrouxamento do molde e machos, logo após ao vazamento e, como será descrito, pela transferência para o forno de recozimento. Quando em certas fundições, não for possível o tratamento térmico; deve-se pelo menos tomar a precaução do afrouxamento de molde e macho e, quando a peça permite, introduzir-se uma quantidade adequada de



carvão vegetal, internamente, deixando-o queimar lentamente, com a caixa semi-aberta, e para manter uma temperatura de resfriamento o mais lenta possível, que tenta substituir o resfriamento no forno.

A fabricação de chapas finas, de grande área, apresenta sérias dificuldades, na prática; o comprimento deve ser de duas a três vezes sua largura com espessura de cerca de $1/15$ a $1/10$ da dimensão mais curta da chapa, dentro de certos limites. Ao fundir placas circulares, deve-se introduzir perfurações, em certo número. É preferível, neste caso, fundir a peça em duas metades, se possível.

Com superfícies planas, constitui uma vantagem se o centro da peça puder ser reduzido, em espessuras, a 65% em relação à sua periferia. Os recipientes (como cadinhos, vasilhames, etc.), devem sempre ter rebordos ou nervuras, reforços ou alêtas, em torno da sua extremidade superior, o que dá maior espessura de metal, no aro, de cerca de duas vezes aquela do resto da peça. Os furos para pinos, ou saídas, ou outros com o mesmo propósito, devem ser os mais largos possíveis, devido à tendência dos pequenos machos de areia de se sintetizar quando em contacto com as secções mais grossas do metal quente. Não se pode empregar chapelins como suporte, sendo portanto, de grande valia se o modelista ou projetista prever uma colocação adequada de tubos de saída, furos dos pinos e extremidades abertas, que dão pontos suficientes para



suportes dos machos. Tem-se, neste caso, substancial barateamento nas peças e reduzido o perigo de perdas, além de tornar desnecessário uma marcação extra no modelo.

As peças de ferro fundido ao silício devem ser cerca de 25% mais grossas que as normalmente especificadas para ferros cinzentos comuns, em vista da diferença de resistência mecânica. Deve-se evitar variações bruscas de secções; se absolutamente necessárias, deve-se reservar lugar adequado para permitir, ao fundidor, a colocação de resfriamento, coquilhas, etc., quando da moldagem [6].

3.7.2. Moldagem

Devido à susceptibilidade, dos ferros fundidos alto silício, ao hidrogênio, todos os moldes, de certa envergadura, devem ser feito em areia estufada. Devem-se evitar areias com resistência elevada, a fim de permitir uma rápida quebra na desmontagem e razoável colapsibilidade durante o vazamento. Em outras palavras: deve-se escolher uma areia que dê o melhor balanceamento entre uma alta colapsibilidade e uma razoável resistência antes da peça ser vazada. Uma areia típica, para esse propósito, empregada no IPT, é dada na Tabela 13.



Tabela 13 - Areias típicas usadas no IPT de São Paulo, para moldagem de ferros fundidos alto silício.

Componentes	Areia para faceamento (a verde)	Areia para machos	
		A	B
Areia de São Vicente — Módulo 90-100 (g)	1.000	2.000	2.000
Areia usada (g)	1.000	—	—
Argila Jaçanã, pó (g)	100	100	200
Óleo olítico (g)	—	10	10
Dextrina (g)	—	40	40
Mogul (g)	—	—	—
Água (ml)	100	100	100
<i>Características</i>			
Umidade (%)	4,0	4,2	4,8
Permeabilidade (AFS)	50	43	36
R. à compressão (Kg/cm ²)	0,50	0,09	0,30
Deformação (%)	4,0	2,6	3,1
Escoabilidade (AFS)	78	86	82
Após estufagem durante 3 h a 110°C e a 220°C, respectivamente.			
Permeabilidade (AFS)	—	70	70
R. à compressão (Kg/cm ²)	12,65	8,44	11,25
Dureza (AFS)	—	82	76

Observações:



1. Recomenda-se pintar os moldes com tinta à base de grafita, a fim de protegê-los durante o vazamento. Uma tinta empregada com êxito, no IPT, é: Grafita (95% de carbono, mínimo) = 40 partes em peso; Argila coloidal = 2 partes em peso; Dextrina = 2 partes em peso; Água = 100 partes em peso. O Navy Research Laboratories, dos EUA recomenda a seguinte composição: Bentonita = 0,8%; Dextrina = 1,3%; grafita = 31,1%; Benzoato de sódio = 0,1% e Água = 66,7%. Esta tinta deve apresentar uma Densidade Baumé = 30°C. é aplicada por pincelamento ou "sprayer".

2. A colapsibilidade do macho pode ser aumentada pela adição de 0,5% de serragem.

3. Uma maior permeabilidade pode ser conseguida pela utilização de uma areia base mais grossa (módulo de finura AFS = 60.70).

Os moldes são assentados em estrados metálicos, em berço de areia de fundição; o conjunto é levado à estufa para secagem a 250°C, de preferência à noite. Pequenas peças podem às vezes, ser fundidas a verde.

A alta contração de solidificação desses ferros fundidos, obriga um projeto para machos que permita uma rápida colapsibilidade, a fim de prevenir tensões na peça ao solidificar, que produzem tanto como já referido na composição química, as trincas a quente ("hot tear").



Para machos retos, axiais, emprega-se barro moldado sobre uma fundição feita de corda de palha enrolada num cilindro de aço, perfurado em todo seu comprimento e superfície, para ventilação. O macho é moldado até sua forma final, assentando-o numa bancada e fazendo-o passar por um gabarito desbastador (por torção). Para cotovelos e outros machos não axiais usa-se as areias, indicadas, moldadas em caixas de machos comuns, de madeira. Os machos de barro, são secos em estufa a 150°C.

Tubos longos:

A fundição de tubos longos, de pequeno e médio diâmetro apresenta-se sobremaneira dificultosa, devido a necessidade de se evitar os "chapelins" que, normalmente, não caldeando com o material, dariam falhas e porosidade. Neste caso, o macho tem de ser suportado nas suas extremidades por marcações de macho muito mais extremas que as empregadas para machos de ferro fundido comum ou mesmo aço. Dependendo do diâmetro, sendo o comprimento excessivo, é preferível se fundir os tubos em várias secções, e depois, juntá-las por meio de solda. Quando se trata de tubos fechados em uma extremidade, se pode, também, fundi-los abertos e, posteriormente, fechá-los por meio de solda. Para peças, em geral, deve-se aplicar resfriadores nos pontos onde o metal é mais fino, tomando como base, a média de espessura da secção transversal da peça. O emprêgo de canais finos, de distribuição e, principalmente, de ataque (entrada),



representa regra geral para fácil e espontânea separação dos mesmos e dos maçalotes, mesmo no resfriamento do metal [6].

3.7.3. Fundição

1ª e 2ª fusões:

Para garantir a homogeneidade do material, evitando um excesso de grafita, de silício, ou de gases retidos, recomenda-se sempre um processo de dupla fusão, ou seja, de se fazer uma lingotagem preliminar da carga, a qual é, posteriormente, refundida, feitas as correções necessárias na composição química, para vazamento no molde.

Essa técnica, entretanto, devido às condições oxidantes que predominam no forno (forno elétrico), onde se faz a primeira fusão, não dá resultados compensadores, pois, além da descarbonetação, existe um descontrole no teor de silício, obrigando um acerto, antes da segunda fusão, que resulta muito oneroso.

Tentando melhorar as condições de primeira fusão, conseguiu-se ótimos resultados por meio de controle da atmosfera do forno, mantendo-a redutora, com a adição do óleo combustível. O óleo é gotejado, durante toda a operação, no banho líquido; a sua combustão propicia o ambiente redutor desejado.



Nestas condições, o ferro fundido de alto silício obtido (cuja composição média calculada foi de $Ct=0,98$; $Si=14,3\%$; $Mn=0,70$ e deu uma composição final (de 1ª fusão) de $Ct=0,65$; $Si=15,3$ e $Mn=0,80$) mostra uma composição plenamente adequada para o uso imediato, quase dispensando uma segunda fusão. Entretanto, devido à retenção de teores ponderáveis de gases, o material apresenta-se poroso e mesmo com aparência heterogênea e de grana que revela material de baixa qualidade. Já isto não se observa depois da 2ª fusão, quando a fratura de um lingote mostra homogeneidade, quase completa ausência de bolhas, próprios de material de boa qualidade. Este material, de segunda fusão, apresentou um $Ct=0,56$; $Si=15,3$ e $Mn=0,70\%$, do que se conclui que praticamente não houve alteração em relação com a composição de 1ª fusão.

Com essa técnica, reafirma-se que praticamente não se teve de fazer adições para correção na composição química, o que evidentemente proporcionou, além da economia das adições, uma melhoria substancial na qualidade do material, apesar de ser levemente onerado o custo por um pequeno gasto de óleo.

Importância da temperatura de vazamento:



A velocidade de resfriamento na faixa de solidificação, tem efeito profundo sobre o tamanho de grão de qualquer metal ou liga; influi decisivamente nas suas propriedades mecânicas e físicas. Deduz-se, daí, que a temperatura de fundição tem influência importante na velocidade de esfriamento, o que torna obrigatório controlar essa temperatura dentro dos limites próprios, se desejarmos uma uniformidade no tamanho de grão na peça.

Já ficou demonstrado, que empregando alta temperatura de vazamento, há a tendência da formação de cristais colunares, grandes. De outro lado, uma temperatura muito baixa produz cristais muito finos. Na temperatura intermediária tem-se cristais de grão moderadamente fino, com bons resultados para as peças obtidas. A temperatura adequada, para os ferros fundidos de alto silício, varia entre 1220°C a 1280°C (medida com pirômetro ótico, de filamento sem correção), sendo que a temperatura mais exata depende do tamanho e secção transversal da peça.

A Fig. 15 apresenta um defeito muito comum em peças desse tipo de ferro fundido, proveniente de uma contração desigual, produzida por uma variação de temperatura e de alimentação do metal no molde, que dá ocasião à formação de cristais colunares oriundos de uma rápida solidificação do metal líquido.



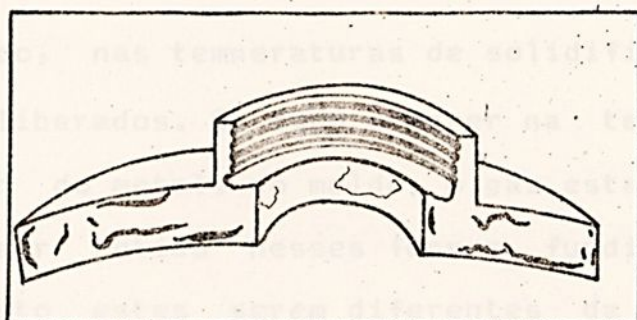


Fig. 15 - Exemplo de contração interna produzida por variação de temperatura e má alimentação do molde. Partes da peça eram destacáveis, em placas [6].

Reduz-se a possibilidade de coquilhamento do molde, por meio de seu revestimento adequado (tintas, etc.). Deve-se ainda empregar areia estufada e uma verificação de melhoria do projeto e modelos, no sentido de melhorar as condições de alimentação. Em última providência, examina-se a liga quanto a impurezas que possam estar influenciando para tal defeito.

Importância do conteúdo de gases

Um dos piores problemas, para a produção de peças "sadias", é o representado pelo conteúdo de gás dissolvidos. Nas ligas de ferro fundido alto silício,

como em outras ligas ferrosas, a solubilidade dos gases é muito maior no estado de fusão do metal do que no seu estado sólido, nas temperaturas de solidificação, esses gases são liberados. Se isso ocorrer na temperatura de solidificação do metal, no molde, o gás estará muito mais sujeito a ser retido nesses ferros fundidos de alto silício, visto estes serem diferentes da maioria das outras ligas fundidas, por possuírem uma variação de solidificação muito mais estreita. Deve ser lembrado que as curvas liquidus-solidus do sistema binário Fe-Si são quase coincidentes nas porcentagens significativas de silício. Julga-se ser, provavelmente, essa estreita variação de solidificação o fator inibidor mais importante de liberação dos gases dissolvidos, durante o resfriamento.

Várias experiências já realizadas têm demonstrado que a porosidade, devida a gases nas peças, é produzida por um efeito combinado de monóxido de carbono e hidrogênio, sendo este último a causa primária do mencionado efeito. O volume de CO desprendido de um corpo de prova retirado de uma peça sólida, submetido a uma análise por fusão fracionada, a vácuo, foi da mesma ordem que o volume de hidrogênio, concluindo-se que ambos coexistem em descontinuidade no metal. Ficou demonstrado que peças "sadias" têm, invariavelmente, conteúdos de hidrogênio inferior a 2 ml/100g, enquanto que, aquelas que apresentam porosidade evidente, dão valores que



atingem, em muitos casos, entre 10 e 12 ml/100g.

3.7.4. Absorção de Hidrogênio

Analisando-se os fatores prováveis que influem no aumento do conteúdo de hidrogênio no metal deve-se ressaltar o seguinte:

A sucata de aço, limpa e seca, uma das matérias primas empregadas, tem um conteúdo de hidrogênio de cerca de 6 ml/100g. Os ferros-ligas, podem ter até 9 ml/100g. Mesmo usando-se matérias primas secas, têm-se um excesso, na carga, de um máximo de 3 ml/100g, além do máximo aceitável que são os 2 ml/100g, já indicados. Pode-se ainda ter-se absorção de hidrogênio da umidade remanescente nos revestimentos dos fornos e panelas, e nos moldes imprópriamente secos. Daí o cuidado especial a ser dado às matérias primas, etc., e ao refino no forno para assegurar um metal livre, o mais possível, de concentrações deletérias de gás [6].

Técnica de Desgaseificação

O meio mais efetivo de se evitar essa influência nociva dos gases seria o da desgaseificação, que consiste em aplicar, no material fundido, o borbulhamento de gases inertes quanto ao metal (como o cloro, o nitrogênio, o monóxido de carbono e/ou a mistura de nitrogênio-monóxido



de carbono); toma-se como base de comparação o mesmo metal obtido sem desgaseificação e o material fundido sob vácuo. A fundição sob vácuo produz um material suficientemente desgaseificado, mas requer não só a respectiva bomba de vácuo como também forno de indução adequado, inclusive para permitir a colocação de uma campânula própria para se produzir o vácuo necessário. Trata-se, pois, de operação dificultosa e de aplicação prática pouco efetiva.

Em cada experiência, referente a desgaseificação por um determinado gás, aplicou-se três tipos de moldes, ou seja, feitas em refratários; moldes feitos com areia a verde. Cada borbulhamento foi executado com dois tempos diferentes, ou sejam com 5 e com 10 minutos, tomando-se como base um volume constante de gás borbulhante. A comparação entre os três moldes diferentes é justificada pelo fato de que os moldes de refratário seriam livres de gases, desde que são feitos com tijolos refratários e rejuntados com massa plástica inorgânica, perfeitamente secos em estufa à cerca de 250°C . Os moldes de areia, estufados, contêm uma quantidade de umidade baixa, quase nula; os gases gerados no vazamento serão os de decomposição dos aglomerantes orgânicos presentes na areia, os quais geralmente exercem sua influência na fundição normal e podem ser absorvidos pelo metal líquido. Os moldes feitos com areia verde, além de possuírem os mesmos gases que os estufados, têm ainda um



grau de umidade tal que pode fornecer uma maior quantidade de hidrogênio, reproduzindo portanto, piores condições para vazamento do metal. Evidentemente a comparação feita com o material, vazado nas mesmas condições, mas que não foi desgaseificado, mostra a influência dos gases do metal; a fundição feita sob vácuo, dá a comparação com um metal nas melhores condições de desgaseificação. Estas duas últimas condições representam condições padrões de comparação.

A técnica de produção e borbulhamento de gases foi executado, servindo-se de: Cloro - em torpedo; Nitrogênio - em torpedo; CO - obtido em gerador de CO, conforme projeto do IPT; mais CO+N₂ gerador de gás, tipo gasogênio.

Os métodos de medida de vazão de gás, foram feitos por meio de manômetros, adaptados diretamente na tubulação de saídas dos torpedos ou de geradores de gás, a fim de se ter uma quantidade constante (volume) de gás, para cada gás, borbulhando no metal líquido. Essa vazão correspondeu a 1.416 litros de gás/hora ou 23,6 litros/minuto.

A medida de temperatura de fusão e vazamento da liga, foi feita com pirômetro ótico e, para todos os casos, foi mantida em: Fusão no forno antes do vazamento = 1.380°C; Vazamento no molde = 1.260°C.

A composição química da liga, feita por cálculo de carga, foi controlada por análise química.



Para a série de experiências, foram estabelecidos corpos de prova com as seguintes dimensões: espessuras 10,30 e 50 mm; largura = 50 mm; altura = 140 mm. Assim foi feito para que esses corpos de prova reduzissem as variações mais usuais das peças (máximas, médias e mínimas), bem como para caberem na máquina de ensaio de dobramento, existente no IPT onde eram fraturadas posteriormente. As superfícies fraturadas, foram retificadas e polidas, como para macrografia, para observação e divulgação.

Devido à impossibilidade momentânea de se medir o teor de gases retidos, por análise gasométrica no metal, usa-se controlar a desgaseificação por comparação, entre corpos de prova, da sua superfície. Entretanto, anteriormente, já havia sido dosado os gases em ferro fundido alto silício no estado bruto de fusão que revelaram em média 4,9 a 6,6 ml/100g H₂. Isto deu a indicação de que partíamos de materiais já com relativo baixo índice de gaseificação, porém acima dos 2 ml/100g aceitáveis.

As experiências executadas revelaram que para melhores conclusões deve-se gaseificar propositadamente o material para poder-se ter uma observação melhor, desde que não pode-se efetuar a análise química. Outro ponto revelado pela experiência é que o cloro não age como desgaseificante eficaz.



Dos outros gases, o N_2 e o CO e a mistura $CO+N_2$, mostraram-se equivalentes em capacidade de desgaseificação; o último parece ser mais econômico, devido a sua fácil obtenção por meio de um gasogênio. Outra conclusão é que os tempos de borbulhamento (de 05 e 10 minutos) são equivalentes em eficiência; podendo-se portanto, adotar 5 minutos como mais econômico. A vazão de gás pode ser aumentada, produzindo-se um borbulhamento mais intenso, porém, a prescrita já dá resultados satisfatórios, além de garantir uma segurança de operação, sem o perigo de projeções de metal líquido para fora do forno.

Outro ponto a salientar é o de que, na proporção em que a espessura da peça diminui, a desgaseificação resulta mais eficiente; com espessuras da ordem de 10 mm, tem-se conseguido, em todos os casos, peças aparentemente isentas de gases [6].

3.8. Tratamento Térmico

A resistência à tração dos ferros fundidos de alto silício é bem mais baixa do que a do aço doce; sua ductilidade, medida em alongamento e redução de área, é praticamente nula, tudo à temperatura normal. Como, doutro lado, sua contração na solidificação é elevada, da mesma ordem da do aço, pode-se antecipar que o resfriamento produzirá tensões altas nas peças, o que



torna-as suscetíveis de trincas. Para atenuar essas tensões é que se processa a desmoldagem dessas peças a quente e se submete-as a tratamentos térmicos, que asseguram a anulação de tensões residuais.

3.8.1. Recozimento

O diagrama de equilíbrio binário das ligas Fe-Si resulta que, para os ferros fundidos resistentes à corrosão pelos ácidos, na região em torno de 15% de silício, não se processa nenhuma mudança de fase na liga sólida. Enquanto não fiquem plenamente esclarecidos os estudos sobre o sistema ternário Fe-C-Si, todo o trabalho experimental até agora feito mostra que, nas ligas homogêneas, a única fase de silício é a fase alfa.

Considerando-se este aspecto, a finalidade do recozimento fica sendo um tanto obscura, a não ser como um simples tratamento de alívio de tensões. Várias experiências relatadas na literatura, com o fito de examinar as propriedades mecânicas de deflexão de ferros alto silício, nas temperaturas de recozimento, mostram que a deflexão inicia-se a 650-750°C e é progressivamente maior com temperaturas mais elevadas, elevando-se rapidamente neste início e diminuindo depois de um certo tempo, apresentando uma anomalia a 700°C, onde a barra dobra em direção oposta à carga aplicada. Esse resultado foi interpretado como evidência de tensões internas no



material bruto de fusão. A deflexão permanente, devida à tensão aplicada, nas temperaturas de recozimento, em vez de ser uniforme, em quantidade, na direção da força aplicada, foi acrescida ou diminuída de uma quantidade adicional devida às tensões internas. Sob essas circunstâncias, a magnitude dessa tensão interna foi suficiente para apresentar a deflexão negativa.

Os mesmos pesquisadores mostram que, à temperaturas mais altas que 700°C , os ferros fundidos em questão, apresentam um alto grau de plasticidade, tomado como termo de comparação com os característicos próprios a temperatura ambiente normal. A temperaturas mais altas que 800°C , revelam um amolecimento excessivo, que possibilita uma distorção das peças. A resistência dos ferros alto silício, em tais temperaturas, nos dá uma indicação para seu manuseio, quando se desmolda para levá-los aos fornos de tratamento térmico.

Os ferros silício apresentam pequenas quantidades de uma fase de um carboneto, disperso ao acaso, através de toda a secção transversal das peças que é instável e facilmente decomponível pelo tratamento térmico. A presença dessa fase, nas peças, foi reconhecida como fator principal de possibilidade de trincas em serviço.

A adoção de um recozimento é imprescindível para a eliminação de tensões internas, bem como para a eliminação desses carbonetos instáveis. Neste tratamento, as peças são removidas dos moldes, quando ainda sólidas,



porém, ao rubro ($600 - 700^{\circ}\text{C}$) e antes que as tensões de contração tenham tempo de se manifestar, completamente. Falhas ou erros nesta regra, dão geralmente peças trincadas. É importante remover-se os maçalotes e afrouxar ou remover os machos, eliminando ao máximo a areia, antes que a temperatura desça a 800°C . Imediatamente as peças são colocadas em um forno elétrico (ou a óleo) mantendo-se-as a 800°C por 4 a 5 horas, seguido de um resfriamento lento no forno até a temperatura ambiente, num período de 30 horas, o que dá aproximadamente uma queda de $20-30^{\circ}\text{C/hora}$.

O ciclo de tratamento térmico é crítico, como já referido, para as propriedades físicas e mecânicas do material. Experimentalmente já temos aplicado velocidades de resfriamento maiores que vão até 40°C/hora , com resultados. Em segundo plano parece existir uma concentração dupla em torno das temperaturas de $200-400^{\circ}\text{C}$ (mais exatamente 280°C), onde o material apresentaria 2 tipos de contração diferencial, o que obrigaria a um resfriamento bem lento nessa faixa de temperaturas.

Do outro lado, o tratamento térmico dita a manutenção por 4-5 horas no forno e a literatura experimental é omissa se o tratamento térmico pode ser feito em 1 ou mais horas, em função da espessura da peça tratada. Tem-se feito tratamento de 1 e 2 horas, com resultados perfeitamente satisfatórios, em peças de secções as mais variadas [6].



3.9. Limpeza, Rebarbação, Usinagem e Solda

As peças em ferro fundido alto silício se apresentam geralmente razoavelmente limpas de areia; em alguns casos é necessário submetê-las a limpeza por jato, inclusive para melhoria de acabamento superficial. A rebarbação se processa normalmente, com os esmeris adequados, não representando maiores dificuldades. Devido à sua alta dureza, é prática geral executar algumas operações de usinagem por meio de retífica, com máquinas e ferramentas adequadas, como, por exemplo, carboneto. As operações de torneamento, acabamento de furos e faceamento podem ser feitas, rapidamente, por qualquer método, com o devido equipamento, devendo-se por isso, prever as furações, etc., por meio de machos, na fundição.

Os ferros fundidos alto silício têm boa capacidade de solda, o que representa uma vantagem para se poder adaptá-los às exigências dos projetos e de montagem das peças. Deve-se dar preferência à solda oxi-acetilênica, obedecendo à seguinte técnica de operação:

Preaquecimento: Aquecer a peça a 700°C , antes do início da solda. Essa temperatura deve ser mantida em torno da solda até ser completada.

Fluxo: Consiste numa mistura em partes iguais, de ferro-silício, ferro-manganês e borax.



Chama: Levemente oxidante. Evitar chama neutra ou redutora, a fim de não introduzir hidrogênio no metal fundido.

Eletrodos: De ferro fundido alto silício, produzidos na fundição, obtidos em moldes de areia.

Recozimento: Depois de completada a solda, a peça deve, obrigatoriamente, ser mantida em forno de recozimento, 700-800°C, por uma hora e esfriada lentamente, no forno, até a temperatura ambiente, a fim de evitar trincas devidas a tensões residuais [6].

3.10. Conclusão

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos com alto teor de silício, da sua finalidade de aplicação da melhoria e desenvolvimento da técnica de trabalho e prática de fundição, permite-se obter, com eficiência e bom rendimento, peças de boa qualidade para aplicação industrial.

Na fundição de peças de ferros fundidos de alto teor de silício é aconselhável observar um controle rígido e sistemáticos da composição química da liga; aplicação da técnica de duas fusões, antes da fundição definitiva das peças; estudo cuidadoso dos projetos e modelos das peças; moldagem em areia apropriada; aplicação de canais de alimentação e maçalotes bem dimensionados e convenientemente colocados; controle rígido da

temperatura de vazamento; desgaseificação obrigatória; desmontagem a quente e resfriamento lento, em forno, segundo ciclo apropriado para decomposição dos carbonetos e para impedir o aparecimento de tensões internas [6].

No Brasil a fundição da Electro Aço Altona tem procurado desenvolver os aspectos citados acima.

4.2. Propriedades

O chumbo metálico tem cor cinza prateada, é macio, maleável, possui baixa resistência mecânica e apresenta fluência à temperatura ambiente.



CAPÍTULO IV

4. TOXICOLOGIA DO CHUMBO

4.1. Considerações Gerais

Uma exposição excessiva aos óxidos de chumbo e seus compostos pode resultar ao longo do tempo, envenenamento ou intoxicação, com consequências aos sistemas gastro-intestinal, nervoso central, fígado, rins e sangue [13].

Devido ao múltiplo uso, deve-se ter um cuidado muito grande na identificação e no manejo dos compostos de chumbo.

É interessante oferecer - aos trabalhadores as seguintes informações: assimilação do chumbo pelo organismo; métodos que existem para detectar os perigos do chumbo através de provas e análises físico-químicas; proteção dos processos vinculados ao chumbo; seleção e treinamento dos trabalhadores para adequá-los às áreas de trabalho com o chumbo [14].

4.2. Propriedades

O chumbo metálico tem cor cinza prateada, é macio, maleável, possui baixa resistência mecânica e apresenta fluência à temperatura ambiente.



Sua densidade é de 11,344 (20/4°C), seu ponto de fusão é de 327,4°C e de ebulição 1.744°C.

Apesar do chumbo ser o mais macio dos metais básicos usados na artes comerciais, é também o mais pesado.

O chumbo fundido desprende emanções nocivas de chumbo e óxidos de chumbo, cuja quantidade aumenta com o aumento de temperatura.

O chumbo é ligeiramente solúvel em água fria ou quente enquanto que o é consideravelmente em ácido nítrico e ácido sulfúrico concentrado e quente. Resiste à ação da maioria dos ácidos, em concentrações avançadas e a temperaturas ordinárias. Ao expor-se ao oxigênio, oxida-se rapidamente formando uma capa protetora (película apassivadora) que impede que a oxidação continue. A dose de 0,5g de chumbo é considerada mortal. A absorção de mais de 0,5 mg diariamente, determinará acúmulo e toxidez [13].

4.3. Análise de Risco

4.3.1. Classificação do Risco de Toxidez [15]:

(escala detalhada em 4.3.2.)

- Agudo local: 0

- Agudo Sistêmico: ingestão 3, inalação 3.



- Crônico local: 0
- Crônico Sistêmico: ingestão 3, inalação 3.
- Absorção pela pele: 3.

4.3.2. Código de Classificação de Riscos Tóxicos:

- 0 Nenhum: (a) Não há dano sobre qualquer condição;
(b) Prejudicial somente em condições não usuais ou dosagens excessivas.
- 1 Leve: Uma vez revertida a causa os sintomas desaparecem após exposição.
- 2 Moderada: Pode envolver condições reversíveis ou irreversíveis mas que não causam a morte ou invalidez permanente.
- 3 Alto: Podem causar morte ou invalidez permanente após muito curta exposição para pequenas quantidades.
- U Ignorado: Não há informações sobre o homem que possam ser generalizadas.

4.4. Toxicologia e Primeiros Socorros

4.4.1 Riscos



Entre os procedimentos necessários que se empregam na fabricação e acabamento, das distintas classes de produtos de chumbo, inclui-se o aquecimento, limagem e a volatilização, todos os quais descarregam partículas (pó) e emanções na atmosfera. O maior perigo de uma exposição excessiva ao chumbo, constitui a desmontagem de cascos de navios, a fabricação de baterias, pinturas de automóveis, cerâmicas e as operações de fundição e solda.

A exposição às emanções do chumbo, proveniente de soldas, quando se aquece o metal até fundi-lo e ao pó de chumbo proveniente de limaduras provoca a maioria de problemas de saúde na indústria, vinculados ao chumbo. O manuseio a granel e sem controle, de compostos de chumbo, e a pulverização de pinturas, esmaltes e vernizes que contém chumbo, podem provocar exposições perigosas [16].

Os compostos orgânicos de chumbo como são os alquilos de chumbo e em particular o chumbo tetrametila ou tetraetila, apresentam problemas especiais que merecem ser tratados em separado. Estes são os únicos compostos de chumbo que podem ser absorvidos rapidamente através da pele sã e intacta. Estes compostos são voláteis a temperaturas ordinárias e devem ser manejados com cuidado extremo, para evitar sua inalação e o contato com a pele. Os fabricantes destes compostos têm regulamentos e procedimentos estritos que devem ser observados rigorosamente.



O uso principal dos compostos orgânicos de chumbo é como aditivo para os combustíveis de motores e em um menor grau em processos químicos. Apesar de que os combustíveis de motores que contêm chumbo encerram um perigo mínimo durante seu manejo. Deve-se proibir o uso para outros fins que não seja o especificado.

4.4.2. Absorção de Chumbo

As plantas (incluindo o tabaco) e os animais, normalmente têm pequena quantidade de chumbo. Estas quantidades não produzem prejuízos sérios no organismo, sempre que se mantiver um nível tolerável e que o chumbo se elimine à medida que é absorvido.

Produzir-se-á um acúmulo, no entanto, se o coeficiente de absorção superar o coeficiente de eliminação. O chumbo pode ser um veneno acumulativo se qualquer porção deste, que não se elimina, for retida no organismo. Uma exposição ao chumbo, com o tempo, pode dar como resultado um envenenamento ou uma intoxicação (saturnismo) com desordens graves no sistema gastro-intestinal, no fígado, nos rins, no sangue e no sistema nervoso central. Um acúmulo suficiente pode eventualmente resultar em uma incapacidade e, às vezes, na morte.



O organismo pode absorver o chumbo e os seus compostos pelas seguintes formas [14]:

- por inalação;
- por absorção através da pele;
- por ingestão.

Apesar de que o chumbo pode entrar no organismo por absorção através da pele ou por ingestão, a forma mais comum nas operações industriais é por inalação. O chumbo inalado pode ser absorvido rapidamente e provocar um envenenamento em um período curto. São particularmente tóxicos, os compostos de chumbo altamente solúveis, já que ao se depositarem nos pulmões passam facilmente ao sangue.

Sem dúvida as exposições por inalação têm maiores possibilidades de serem reduzidas ou controladas mediante projetos de engenharia. Apesar de quantidade elevada de chumbo que pode entrar no organismo por inalação, em relação à ingestão ou à absorção através da pele, os usuários de compostos de chumbo não devem supor que não deverão cuidar-se em lugares onde só existam perigos devido à ingestão ou à absorção através da pele. O envenenamento acumulativo pode apresentar-se, qualquer que seja a forma pela qual o chumbo é absorvido.

A absorção dos compostos de chumbo, através da pele, está circunscrita ao chumbo tetraetila e a outros compostos orgânicos de chumbo. Se a pele está arranhada ou tem feridas, a possibilidade de absorver chumbo é consideravelmente maior e, por conseguinte, o perigo é



agudo.

De acordo com os doutores Fairhall e Sayers [17], todos os compostos de chumbo não têm o mesmo grau de toxidez relativa. Alguns são altamente tóxicos enquanto que outros somente depois de uma prolongada exposição.

Independentemente da toxidez relativa dos compostos de chumbo à qual uma pessoa se expõe, ocorrerá um envenenamento, se são respiradas concentrações de compostos de chumbo suficientes ou se o trabalhador ingere quantidade suficiente, durante um período suficientemente prolongado. Não se deve pensar que pode descuidar-se das medidas preventivas, nem mesmo reduzi-las porque se tem declarado que um composto é menos tóxico que outro.

De acordo com algumas autoridades médicas, a toxidez comparativa dos compostos de chumbo baseia-se em quantidades variadas; a mais importante das quais é a solubilidade nos líquidos do organismo. Entre outros fatores que influem na toxidez encontram-se os seguintes:

- a - Via de entrada;
- b - Quantidade presente na circulação, em um dado momento;
- c - Velocidade com que o composto forma a solução;
- d - Tamanho e peso das partículas;
- e - Período que esteve em contato com os líquidos;



f - Quantidade inalada ou ingerida;

g - Grau de acidez dos líquidos do organismo.

4.4.3. Assimilação do Chumbo

Quando se inalam partículas de chumbo (maiores de 10 microns) ou de seus compostos, uma grande parte de chumbo passa pela boca, garganta e nariz ou se ingere, expectora ou exala com o ar inspirado. As partículas que têm um tamanho menor que 10 microns, geralmente são aspiradas até os pulmões e depositadas nos tecidos pulmonares. Quanto menores são as partículas maior será sua penetração nos tecidos.

Uma vez nos pulmões, o chumbo é capaz de ser absorvido e distribuído rapidamente pelos tecidos do organismo, já que nesta região se encontra em contato íntimo com os líquidos orgânicos. O chumbo é absorvido pelo sangue e logo circula por todo o corpo. Quando isto ocorre é perigoso e, em quantidade suficiente, é capaz de produzir danos sistêmicos. O chumbo do sangue deposita-se eventualmente, nos ossos e órgãos do corpo ou se elimina através da urina.

Quando o chumbo é ingerido, a maior parte passa sem alteração ao sistema-intestinal e é eliminado desta maneira, por excreção. A maior parte do chumbo que é absorvido pelo sistema gastro-intestinal vai ao fígado. Eventualmente, este abre caminho até outros tecidos do



corpo e também aos intestinos, através da bÍlis.

Quando o chumbo permanece no corpo, uma alta porção deste finalmente deposita-se nos ossos. As autoridades médicas diferem sobre a forma com que o chumbo produz dano ao organismo, depois de haver depositado nos ossos.

Algumas autoridades têm sugerido que o fluxo de chumbo se pode inverter indo dos ossos até o sangue (onde, se o chumbo está presente em quantidade suficiente, pode causar um envenenamento agudo) devido a uma acidose, alterações excessivas de dieta ou a transtornos respiratórios. Outras autoridades médicas duvidam que tais fatores sejam, primordialmente, os responsáveis pela movimentação do chumbo desde a estrutura óssea.

4.4.4. Dermatites por Compostos de Chumbo

Até hoje não se tem notícia de que o chumbo metálico, por si só cause dermatites, apesar de que alguns compostos de chumbo podem provocar irritações cutâneas, entre os trabalhadores que os manuseiam [16].

Os doutores Schwartz e Tulipan [16], em seus estudos intitulados " Enfermidades Ocupacionais da Pele", declaram que existem casos em que se têm produzido erupções cutâneas devido ao contato com preparados que contêm acetato de chumbo e que o arseniato de chumbo e o cromato de chumbo podem provocar dermatites ocupacionais.



Têm-se informado casos de dermatites entre os trabalhadores de fábricas de munições, devido à azida de chumbo e os estifinato de chumbo. Acredita-se que as dermatites provocadas pelos compostos de chumbo devam-se mais à parte não metálica do composto, do que ao chumbo.

4.4.5. Sintomas de Envenenamento

Ao considerar os efeitos do chumbo no organismo é importante reconhecer as variações de susceptibilidade. Este fator e outros de exposição e sua relação com o chumbo previamente acumulado, têm produzido dificuldades para estabelecer uma dose padrão de envenenamento de chumbo, aplicada à todas as pessoas e condições.

Recorda-se que sempre que ocorre uma exposição ao chumbo, haverá um perigo potencial de que este seja absorvido. O grau de perigo depende da magnitude e duração da exposição e das medidas de controle que estejam em vigência.

Os efeitos da toxidez do chumbo podem ser muito diversos. Podem afetar os seguintes sistemas do organismo [16-17]:

- a - Sanguíneo;
- b - Gastro-intestinal;
- c - Nervoso;



d - Córdio-vascular (circulação e coração);

e - Urinário;

f - Reprodutor.

O resultado mais grave de uma absorção excessiva de chumbo, por parte do organismo, é o desequilíbrio na produção de hemoglobina, que é um constituinte dos glóbulos vermelhos do sangue. Este desequilíbrio dá como resultado uma anemia. O chumbo também interfere na formação do sangue devido aos efeitos sobre a medula óssea, que é o principal tecido produtor de sangue.

Há outros efeitos biológicos. Alteram-se os padrões das proteínas do soro sanguíneo. Várias atividades enzimáticas provocam lesões dos tecidos, de gravidade variável. Debilita-se a aptidão de defesa do organismo em contrair enfermidades. Em síntese, uma absorção indevida de chumbo transforma totalmente a química do organismo.

O chumbo, ademais, exerce um efeito entorpecedor sobre o sistema sensorial. Algumas provas têm indicado que a exposição dos trabalhadores ao chumbo pode produzir lesões leves no sistema nervoso. A lesão pode diminuir a eficiência do trabalhador e a atenção necessária para proteger sua integridade física, e passar despercebida.

A primeira coisa que o trabalhador deve saber sobre o envenenamento pelo chumbo é que não há um sintoma subjetivo, nem um sinal clínico objetivo que indique positivamente que está sendo produzido um envenenamento com chumbo. Em alguns casos, o denominado envenenamento



"crônico" pode ser uma das enfermidades ocupacionais mais difíceis de diagnosticar. Um médico deve realizar um diagnóstico à luz de uma história de exposição ao chumbo, (ocupacional ou não), de sintomas subjetivos, de sinais químicos objetivos e de provas de laboratórios.

Há sem dúvida, manifestações gerais sobre os efeitos venenosos produzidos pela absorção do chumbo. Com a continuação, apresentam-se algumas das manifestações mais comuns. No caso de se notar estes sintomas a pessoa exposta deve ser encaminhada imediatamente ao médico.

Transtorno do sistema digestivo, que se manifesta numa falta de apetite, constipação, mal estar abdominal indefinida e nos casos mais graves, fortes dores abdominais, com contrações (cólicas).

Dor e rigidez nas articulações, ossos e músculos (particularmente dos músculos que mais são usados).

Debilidade geral, perda de peso e palidez.

Perda de força dos dedos, mãos e antebraços e inaptidão para usá-la quando se realizam tarefas habituais.

Afecções do sangue, possivelmente causadoras de anemia.

Ademais, podem produzir-se nervosismo, contrações e tremores musculares, particularmente nos dedos. A incidência de febre é rara, embora ocasionalmente, possa apresentar-se uma leve icterícia e, às vezes, um aumento da pressão sanguínea. Às vezes, em uma encefalopatia



plúmbica (transtorno do cérebro) podem apresentar-se irritabilidade, excitação, delírio, convulsões e transtornos visuais, por exemplo, uma ambliopia ou cegueira.

A absorção e o envenenamento do chumbo, pode manifestar-se durante um exame físico, pela presença de uma linha plúmbea nas gengivas. Ao ampliar-se, a linha plúmbica manifesta-se como uma fila definida de pontos azuis, no tecido da gengiva, próximo da linha de junção dos dentes. Sem dúvida, a falta de uma linha plúmbica não indica, necessariamente, que não houve uma absorção do chumbo.

4.4.6. Medida da Absorção

É necessário esclarecer a diferença que existe entre ingestão de chumbo, absorção de chumbo e envenenamento por chumbo. Ao encontrar chumbo nas fezes, constitui-se uma evidência de que algo de chumbo passou (por ingestão) através da via gastro-intestinal e que foi absorvido pelo organismo. A absorção do chumbo manifesta-se pela presença de chumbo na urina e/ou na análise do sangue. O envenenamento pelo chumbo começa quando o chumbo que está no sangue e nos órgãos do corpo começa, realmente, a exercer efeitos prejudiciais. Uma absorção excessiva de chumbo no sangue indica que devem tomar-se medidas para eliminar ou reduzir a exposição, a fim de evitar que esta



continue e que pode ser necessário um tratamento médico para evitar uma lesão sistêmica.

O coeficiente de absorção do chumbo por parte dos trabalhadores pode estar relacionado, não somente com a classe, grandeza e duração da exposição ao chumbo, como também com uma variedade de outros fatores entre os quais se incluem as características do indivíduo, os hábitos de trabalho, o estado de saúde e o grau de esforço que se necessita para realizar o trabalho. Além disso, a intensidade da exposição ao chumbo em um estabelecimento industrial varia consideravelmente de tempo em tempo, devido às variações comuns das concentrações de chumbo que tem o ar que se respira e a troca na produção, problemas de manutenção e a uma infinidade de problemas menores.

O controle do ambiente de trabalho não é o único meio para alcançar uma higiene desejada nas indústrias que usam chumbo. Requerer um fator complementar. Supervisão médica, mais um plano de provas para as pessoas que estão expostas.

Há vários índices biológicos sobre o grau de absorção de chumbo. Entre estes índices incluem-se os seguintes:

- Chumbo no sangue;
- Chumbo na urina;



- Coproporfirina na urina;
- Ácido delta-amini-levulínico na urina (adal).

Acredita-se que o chumbo no sangue é o índice mais confiável de absorção do chumbo e recomenda-se como principal indicador biológico da absorção plúmbica. A concentração do chumbo no sangue é mais suscetível de se relacionar com um envenenamento do chumbo, do que com qualquer outro fenômeno biológico. Tem-se demonstrado que as determinações do chumbo no sangue devem ser precisas; portanto, estas determinações devem ser realizadas por laboratórios competentes.

Os médicos e os higienistas baseiam-se na quantidade de chumbo no sangue dos trabalhadores que são rotineiramente examinados, para determinar a absorção do chumbo, como medida de envenenamento plúmbico. Para interpretar as análises de sangue é necessário um assessoramento médico, já que os investigadores têm encontrado que até quando existe uma concentração que varia de 0.08 a 0,15 mg de chumbo por 100g de sangue integral, o trabalhador não sofreu, necessariamente, um envenenamento plúmbico (esta é sem dúvida, uma forte indicação de um possível envenenamento plúmbico e de que é necessário tomar medidas) [14].

A absorção de chumbo também se manifesta pelo chumbo na urina. Reitera-se aqui que o resultado de testes e exames devem ser julgados pelos médicos, à luz dos sintomas clínicos. As concentrações do chumbo que estão



acima do limite superior dos valores normais; (muito além do valor médio), apesar de que não sejam definitivamente indicativos de uma exposição plúmbico-ocupacional, sugerem a necessidade de realizar investigações mais profundas sobre um possível envenenamento plúmbico.

Na urina mais variáveis vinculadas com a concentração do chumbo do que no sangue. Há várias razões que se explicam o porque desta situação. A concentração de chumbo na urina varia com o consumo de líquido, mais radicalmente, com a exposição ao chumbo, existência de chumbo nos alimentos, nas bebidas e na atmosfera.

Estes fatos devem ter-se em conta quando se efetuam medições de chumbo na urina para controlar as exposições industriais. As amostras esporádicas de 100 a 200 ml variarão consideravelmente, no tocante à quantidade de chumbo que contenham, conforme vários fatores. Por exemplo, a hora do dia na qual se tem tomado a amostra influi sobre a quantidade do chumbo existente, já que a exposição usual numa situação industrial varia consideravelmente durante o dia, e a concentração de chumbo na urina em equilíbrio dinâmico com a entrada de chumbo no organismo.

Outra dificuldade que pode relacionar-se com o método de amostragem de chumbo na urina, para medir a absorção humana, é a contaminação da amostra durante seu recolhimento. Todas as pessoas cuja urina deve ser amostrada encontram-se, obviamente, trabalhando com



chumbo e têm algo de chumbo nas mãos e na roupa.

A determinação da coproporfirina e dos metabolitos Adal na urina é útil como um indicador rápido e sensível de uma absorção anormal de chumbo. Para programas industriais práticos, consideram-se estes metabolitos urinários como um critério de diagnóstico não especialmente útil, já que tal critério mede melhor o efeito do chumbo do que o grau em que este foi absorvido. A supervisão médica deveria avaliar o grau de absorção a fim de que pudessem ser tomadas medidas corretivas muito antes de se produzirem efeitos no organismo.

Todas as provas descritas requerem uma análise de laboratório.

4.4.7. Primeiros Socorros

Não existem primeiros socorros reconhecidos para o envenenamento do chumbo. Todos os casos suspeitos de absorção de chumbo ou de ataque agudo devem ser comunicados imediatamente a um médico. As demoras podem determinar complicações.

Não se deve dar nenhum tratamento médico específico, a menos que se hajam apresentado sintomas específicos de envenenamento plúmbico.

Nos programas de saúde industrial tem-se usado, terapeuticamente, agentes QUELANTES sintéticos. O sal di-sódio do ácido etileno-diaminotetra-acético $\text{Ca}(\text{Na}_2)$



EDTA, que se introduziu em 1952, tem sido usado com êxito como tratamento médico. Ultimamente vem-se empregando como tratamento, penicilamina administrada oralmente.

Estes medicamentos sem dúvida, não se recomendam como medidas profiláticas de rotina em um programa preventivo. Ao confiar-se na profilaxia surge uma tendência de ignorar-se os controles da engenharia, que são essenciais para um bom programa preventivo. Além disso o $\text{Ca}(\text{Na}_2)$ EDTA não deve ser administrado, salvo sob orientação médica (o uso prolongado do EDTA pode ter consequência adversa) [16].

4.5. Medidas Preventivas

4.5.1. Generalidades

O controle da exposição a materiais tóxicos na indústria é, principalmente, um problema de engenharia e de administração. Compreende o controle do pó, a ventilação, o projeto da instalação, uma adequada ordem e limpeza, a educação do pessoal sobre procedimento de higiene, um programa de supervisão médica e a instrução do trabalhador.

O método mais eficaz para evitar um envenenamento com chumbo é substituir o chumbo e seus compostos por outros materiais que não sejam tóxicos. No entanto, isto usualmente não é prático, motivo pelo qual deve-se



recorrer ao controle do ambiente e ao treinamento dos trabalhadores [14].

4.5.2. Controle do Ambiente

As instalações novas a construir e que irão operar com materiais que contenham chumbo, devem ser projetadas de tal maneira que se controle o risco diretamente na sua origem a fim de se reduzir a um mínimo a exposição ao chumbo. Todos os pisos devem ser de material impermeável e fácil de limpar. Deve-se encher ou chanfrar rebarbas, umbrais de janelas, peças estruturais de ferro e outras proteções, nas quais o pó possa alojar-se. O perigo do pó nas paredes, surge pela possibilidade de vibrações ou correntes de ar do ambiente de trabalho. A distribuição das máquinas e equipamentos deve ser feita de forma que a manutenção possa realizar-se facilmente.

Sempre que for prático, deve-se fazer o possível para isolar todas as operações com chumbo, de forma que o menor número de trabalhadores tenha possibilidade de expor-se ao mesmo. Os sistemas de limpeza por aspiração que extraem o ar viciado das operações e lugares de trabalho, devem ser instalados, durante a construção dos edifícios, e os lavatórios, vestiários e refeitórios devem estar separados do ambiente de trabalho.



Nas instalações já existentes, nas quais não é possível incorporarem-se sistemas permanentes de limpeza por aspiração, devem ser usados aspiradores portáteis - Estes equipamentos não somente facilitam a limpeza da instalação, como também possibilitam a eliminação do pó das paredes e bordas, o qual, de outra maneira, não se eliminaria.

Deve-se ter cuidado ao se esvaziarem os aspiradores, a fim de não se criarem riscos de exposições adicionais ao chumbo, pela difusão do pó no ponto de descarga.

Ao se projetarem os vestiários, recomenda-se a utilização de armários duplos, com uma parte para a roupa de trabalho e a outra para a roupa de trânsito, para aqueles trabalhadores que tenham a possibilidade de se expor ao chumbo. Devem-se prever água quente e sabão e instalar-se uma quantidade suficiente de chuveiros e lavatórios, a fim de que os trabalhadores não se descuidem de sua higiene pessoal.

4.5.3. Ventilação

Os tipos de equipamentos de ventilação aplicáveis no caso de chumbo, dependerão principalmente das características do edifício, dos compostos que são usados em particular e dos métodos de fabricação, apesar de que em um local onde se trabalha com chumbo, somente se deverá usar ventilação local por aspiração. Nos



parágrafos seguintes será apresentado uma série de requisitos que devem ser considerados no projeto do sistema.

Deve-se, antes de mais nada, observar todas as normas existentes.

Deve-se ter cuidado no projeto do sistema, a fim de que o ponto de aspiração de ar esteja situado de tal forma, a não haver possibilidade de aspiração do ar contaminado. O volume de entrada deve igualar o volume de saída.

Às vezes é necessário, em tempo frio, aquecer-se o ar de entrada, a fim de que o sistema de aspiração funcione corretamente.

Não se deve utilizar a prática de recircular-se o ar viciado de um local onde haja exposição ao chumbo, para outros locais. Todos os sistemas de aspiração devem estar equipados com um sistema de retenção de pó e fumos, para evitar a descarga de ar contaminado.

O sistema deve ser projetado de forma que seja à prova de pessoas ineptas e que os trabalhadores não possam manuseá-lo sem serem descobertos.

Em todo trabalho que desprenda pó ou emanções de chumbo, deve-se instalar um sistema de aspiração local, de forma tal que mantenha a concentração destes contaminantes na zona respiratória dos trabalhadores, dentro do valor $0,15 \text{ mg/m}^3$ para o TLV ou ainda abaixo quando a exposição é contínua.



Quando são empregados sistemas locais de aspiração, os mesmos deverão ser projetados de forma tal que não produzam interferência na eficiência operativa do sistema geral de ventilação e vice-versa. Devem ser evitados contra-correntes de ar de pontos onde possa estagnar-se. Para operações de corte e solda às vezes é necessário recorrer-se ao uso de respiradores com linha de ar ou máscaras, particularmente quando se trabalha com peças grandes. O uso destes equipamentos de proteção respiratória é aceitável, mas deverá ter-se cuidado em não se expor outros trabalhadores que não estejam protegidos.

Somente deverão ser instalados sistemas de aspiração ou ventilação projetados por engenheiros desta especialidade. As reparações dos equipamentos existentes nunca deverão ser realizadas por pessoas inexperientes;

Todos os sistemas de ventilação, exaustão local e de recolhimento de pó, projetados para controlar exposições de chumbo, devem ser controlados periodicamente por um engenheiro competente, para assegurar sua eficiência.

4.5.4. Outras Medidas de Controle

Deve-se prestar particularmente atenção para a possibilidade de se isolarem completamente os lugares onde se trabalha com chumbo, a fim de se reduzir a um mínimo a possibilidade das emanções e pós escaparem para



o ar do ambiente de trabalho.

Quando é necessário derreter chumbo, a temperatura deve-se manter o mais próximo da do ponto de fusão, já que quanto mais elevada for a temperatura do chumbo, maior será a quantidade de emanções que se desprenderão.

Quando higienistas industriais têm recomendado, métodos de umectação para produção, a fim de se evitar descarga de pó no ambiente de trabalho. Nos casos em que a fabricação admite métodos de umectação, estes devem-se ampliar, tendo em vista o perigo que representa o pó de chumbo e o pó de compostos de chumbo que se difundem no ar, ao serem secados. Assim como os sistemas de exaustão, os processos de umectação, devem estar dotados de sistemas de filtração e sedimentação, para evitar descargas com líquidos contaminados com chumbo [16].

4.5.5. Ordem e Limpeza

Além de instalação de aspiradores para efetuar a limpeza, é necessário se estabelecer e observar um programa de ordem e limpeza. Onde não houver uma equipe regular de limpeza, deverá reservar-se todo os dias um tempo durante o qual se exigirá que todos os trabalhadores participem dos trabalhos de limpeza.

Deve ser proibido o emprego de ar comprimido a fim de se eliminar dos pisos, paredes e rebordos, o pó proveniente do chumbo e seus compostos.



Este é um dos métodos mais perigosos de limpeza e relativamente ineficaz, já que com toda segurança, deixará uma elevada concentração de pó no ar. Em algumas instalações as paredes, pisos, rebordos e tetos baixos são limpos com uma mangueira de água e todo o material se conduz para uma drenagem central.

Devem ser previstos recipientes para resíduos e instruir-se os trabalhadores para que usem, ao invés de jogarem materiais no piso em volta das máquinas ou nos bancos. Os resíduos de chumbo, especialmente as escórias, deverão ser cobertos imediatamente após retirá-los do forno e devem ser transportados, tão logo seja possível, até uma sala de armazenamento adequado ou para fornos redutores.

Deve ser proibida a prática de se varrer vigorosamente os pisos, em locais onde se usa chumbo e seus compostos. Se for necessário varrer, essa operação se realiza empurrando-se suavemente com a vassoura, depois de haver regado generosamente o piso em água. Para evitar a formação da poeira e em casos em que a água evaporaria antes de ter terminado de varrer, em vez de se regar com água, emprega-se algumas vezes serragem com óleo.

Os varredores devem possuir e obrigatoriamente usar respiradores aprovados, e se possível, seu trabalho deverá realizar-se em momentos em que os outros trabalhadores não se exponham. É preferível limpar por



meio de aspiração do que por varredura.

Todos os recipientes de compostos de chumbo deverão ter sempre suas tampas colocadas e serem mantidos fechados, quando não estiverem em uso. Quando se translada o material em pó destes tambores até um misturador ou outra máquina de processamento, deverão empregar-se conchas com tampas ou algum outro meio mecânico que evite a contaminação do ar ambiente de trabalho. Também podem usar-se tampas em formas de aros que encaixam nas bocas dos barris.

4.6. Seleção dos Trabalhadores

4.6.1. Exame Físico

Antes de designar um operário para um trabalho, onde haja risco de exposição ao chumbo, o mesmo deverá ser submetido a um exame físico completo por parte de um médico da indústria. Devem ser seguidas as recomendações do médico, quando o operário examinado é encaminhado ao trabalho.

Entre os motivos possíveis para recuar-se a admissão de um trabalhador onde existe a possibilidade de exposição ao chumbo, se incluem a intoxicação de chumbo, uma indicação de um conteúdo anormal de chumbo no sangue ou urina, transtorno dos rins, úlceras estomacais, problemas cardíacos, anemias, constipação, enfermidades



venéreas, tuberculose, álcoolismo e consumo de drogas. Não deve empregar mulheres grávidas ou adolescentes dos sexos masculino ou feminino, em lugares onde haja riscos de exposição ao chumbo. Deve-se fazer notar que muitos desses motivos de recusa também se aplicam em qualquer outra classe de ocupação.

O exame dos trabalhadores deve ser realizado a intervalos regulares que dependerão de [14-15]:

- a) A recomendação do médico da indústria que efetua o exame;
- b) A exposição do chumbo existente;
- c) As leis nacionais.

Em geral quando se usa muito os compostos de chumbo na industrialização, os trabalhadores deverão ser submetidos a um exame físico completo, pelo menos uma vez por ano, preferencialmente com mais frequência, além de serem examinados mensalmente para se determinar se tem ocorrido ou não uma absorção de chumbo.

As autoridades na matéria sugerem que se realizem exames físicos cada seis meses nos locais onde se usa chumbo metálico, cada mês onde se manuseia chumbo ou compostos de chumbo fundidos e cada duas semanas onde se usa chumbo branco ou roxo. Se ocorrer alguma dúvida quanto à frequência com que deverão ser realizados os exames, esta deverá ser esclarecida pelo médico do trabalho, depois de se ter avaliado cuidadosamente detalhes técnicos relacionados com o ambiente físico.



Os trabalhadores devem recorrer ao médico para um controle adicional a qualquer momento em que não se sintam bem.

Entre os controles se incluem a análise de chumbo na urina e no sangue e o estudo cuidadoso do estado de saúde geral do indivíduo. Para que estes controles dêem um bom resultado, devem ser mantidos seus registros.

4.6.2. Valor dos Controles Médicos

É óbvio que em caso de ser detectado uma absorção de chumbo durante as etapas iniciais, o trabalhador deve ser retirado do local de trabalho para se evitar o começo de um envenenamento por chumbo. Embora quando se pensa que algumas pessoas estão expostas somente a um risco leve, as análises de urina e sangue é excessiva. Reiteramos aqui que com a retirada do elemento e com o tratamento adequado se evitará uma intoxicação pelo chumbo.

O serviço de Medicina do Trabalho desempenha um papel importante nos locais onde existe um risco de chumbo, conseqüentemente, suas atividades devem integrar-se convenientemente com as demais tarefas de prevenção.

O serviço de Medicina do Trabalho deve atuar como um controle sobre a eficiência das medidas de prevenção de acidentes. Por este motivo suas observações e recomendações devem ser estudadas cuidadosamente, e



naqueles casos em que apesar das medidas de controle, algumas pessoas manifestam um elevado índice de absorção de chumbo, é necessário realizar uma cuidadosa inspeção de seus lugares de trabalho.

Deve ser estabelecido claramente a origem da absorção anormal de chumbo até se considerar a possibilidade de que a mesma seja devido a outra exposição que não de natureza ocupacional.

4.6.3. Treinamento dos Trabalhadores

Há certas normas mínimas de educação e adaptação que devem ser atendidas pela pessoa que vai trabalhar com o chumbo. Estas normas variam consideravelmente de uma indústria para outra embora a prova mínima será de estabelecer se o candidato poderia ser adaptado e ser treinado para que obedeça às regras de prevenção de acidentes.

Após se haver decidido que um indivíduo é física e mentalmente apto para trabalhar em processos de chumbo, ter-se-á de explicar-lhe cuidadosamente os perigos gerais relacionados com sua tarefa. Simultaneamente terá de lhe serem explicadas as normas de higiene pessoal e a política de prevenção de acidentes da empresa. Antes do elemento iniciar finalmente o trabalho, um integrante do Serviço de Segurança do Trabalho, deverá assegurar-se de que o novo empregado compreendeu completamente as normas.



Quando os trabalhadores estão em período de "adaptação" em seus trabalhos, deve-se seguir um procedimento definido para assegurar-se se sabem o que devem fazê-lo. A melhor forma de se conseguir isto consiste, primeiramente, em explicar-lhes totalmente o trabalho e os fundamentos das regras. Além disso, deve-lhes ser dada a oportunidade de expressarem suas idéias à cerca do que lhes foi dito, com que o instrutor terá condições de corrigir qualquer interpretação errada.

Os instrutores deverão realizar demonstrações várias vezes se for necessário e, finalmente, permitirá ao trabalhador a realização da operação. Nesta etapa tem-se oportunidade de corrigir qualquer prática insegura ou trabalho insuficiente.

Depois que o instrutor está seguro de que a pessoa entendeu e pode realizar a operação com precaução e eficiência, pode ser permitido ao trabalhador que realize sua tarefa por si mesmo, embora ainda deva ser controlado periodicamente, para se assegurar de que estão sendo obedecidas todas as normas de prevenção de acidentes e saúde. Deverá seguir-se o mesmo procedimento quando se transferem trabalhadores de uma oficina para outra, ou de uma operação para outra.

4.6.4. Higiene Pessoal



trabalhadores e empregados de comer [167].

Deve ser insistido na limpeza pessoal das partes expostas do corpo, como unhas das mãos, bigodes e cabelos. Deve ser exigido dos trabalhadores que tomem um banho de chuveiro todas as tardes, antes de abandonarem o prédio e trocarem a roupa do trabalho pela da casa. Se os trabalhadores escovarem a roupa ou se pentearem os cabelos, para eliminar o acúmulo de pó, no local de trabalho, poderão contaminar o ambiente.

O serviço de Medicina do Trabalho pode, de vez em quando, emitir notas sobre as dietas corretas que devem seguir os trabalhadores que se expõem ao chumbo e seus compostos. Devem, além disso, estimular os trabalhadores para que durmam bastante e tomem sol quanto for possível.

Deve ser proibido aos trabalhadores o consumo de cigarros no local de trabalho, salvo nos refeitórios ou em outros lugares designados, durante a hora de almoço e somente depois que tenham feito uma higiene completa.

Deve ser proibido completamente comer em ambiente de trabalho onde se manuseia chumbo. É difícil se exigir o cumprimento desta regra, a menos que se ofereça um lugar adequado onde os trabalhadores possam comer com comodidade.

Os refeitórios devem estar isolados de qualquer exposição ao chumbo e será obrigatório os trabalhadores lavarem muito bem as faces e as mãos antes das refeições. Em alguns casos pode ser necessário estimular os



trabalhadores a trocarem de roupa antes de comer [16].

4.7. Equipamentos de Proteção Individual

Para evitar a possibilidade de absorção pela pele principalmente após longo tempo de exposição, sempre devem ser utilizados luvas, aventais no manuseio com composto de chumbo.

Quando houver formação de poeira ou fumos, e não existirem as medidas adequadas de controle, deve ser previsto o equipamento adequado de proteção respiratória, específico para partículas de natureza tóxica. Cada Serviço de Segurança e Medicina do Trabalho deve especificar este equipamento através de consulta ao fabricante especializado.

Os óculos de segurança também são recomendados para se evitar qualquer contato com as vistas.

4.8. Conclusão

A intoxicação saturnina, conhecida desde remota antiguidade tendo sido assinalada por Hipócrates, é uma das mais frequentes do século atual, face a grande aplicação do chumbo na indústria [13].

O chumbo pode penetrar no organismo por três vias, apresentadas em ordem decrescente de frequência em Medicina do Trabalho.



a) Via respiratória - através de poeira e fumos metálicos:

1) Por inalação: totalmente absorvido pelo pulmão sob a forma de carboneto de chumbo;

2) Por fagocitose.

b) Via digestiva - através de cigarros e alimentos ingeridos no local de trabalho, principalmente o leite que sempre acompanha os que trabalham com chumbo que têm a errônea suposição de ser esse alimento antitóxico. No tubo intestinal, sob a forma de cloratos, pequena parte é absorvida e a maior quantidade é eliminada com as fezes.

c) Via cutânea - o metal penetra principalmente sob a forma de tetraetilênio, usado em mistura com a gasolina.

Todos os derivados de chumbo absorvidos, qualquer que seja a via, são levados ao fígado onde tomam destinos diferentes sendo uma parte excretada pela bile, outra armazenada e ainda outra entra na circulação sistêmica como fosfato de chumbo, que se distribuirá em vários tecidos.

O principal efeito tóxico do chumbo se faz sobre o tecido hematopoético, onde vai interferir na síntese do heme por bloqueio dos grupos sulfidrilas de algumas enzimas, principalmente o ácido delta-aminolevulínico-dehidrose, coproporfirinigenase e hemossintetase.



As principais manifestações na intoxicação pelo chumbo, além da anemia, são os distúrbios gastrointestinais e os do sistema central [14].

Intoxicação aguda: Verificada na ingestão de compostos de chumbo solúveis ou rapidamente absorvidos.

Sintomas: calafrio, gosto metálico pela ação dos sais de chumbo sobre a mucosa bucal, dor abdominal intensa, náuseas e vômitos, por vezes diarreia com fezes pretas de constipação; oligúria consequente à lesão renal, hemoglobinúria, colapso e coma. Caso o chumbo sanguíneo ultrapasse a 0,1 mg/100 g, poderão surgir sintomas de encefalopatia, muitas vezes de forma súbita, principalmente em se tratando de crianças.

Intoxicação crônica: Verificada pela penetração do chumbo por qualquer via.

a) Sintomatologia inicial:

Predominam os sintomas digestivos: orla gengival cinzenta por depósito de chumbo na gengivas, permanente gosto metálico, língua seca, náusea e vômito, constipação, algumas vezes seguida de diarreia. Anorexia, perda de peso, sinais de apatia ou irritabilidade, anemia hipocrônica.

b) Sintomatologia médica:

Exacerbam-se os sintomas digestivos os vômitos tornam-se intermitentes. Surge o comprometimento do aparelho locomotor, com astralgias, paralisias caracterizadas pela queda dos punhos e dos pés. Os



sintomas nervosos apresentam-se mais intensos, com excitabilidade e incoordenação motora.

c) Sintomatologia grave:

Persistem os sintomas digestivos com a observação da cólica saturnina, caracterizada pela: dor abdominal viva, vômito e tenaz conspiração. Acentuam-se os fenômenos nervosos, com atoxia, torpor, encefalopatia hipertensiva, edema de papila, paralisias, delírio, convulsões e coma. O aparelho renal é comprometido, verificando-se oligúria, cilindrúria, albuminúria, glicosúria, além da hemoglobínúria que já existe desde a fase inicial. A lesão renal pode ser estabelecida desde que o paciente sofra uma exposição de 1 a 2 mg diariamente durante 10 anos.

A exposição do chumbo tetraetila ou tetrametila produz insônia, sonhos perturbantes, irritabilidade emocional, hiperatividade e até processos tóxicos.

O chumbo largamente utilizado em indústria de acumuladores elétricos, automobilística, no ramo de funilaria, pigmentos para tintas, estabilizadores para plásticos, condutores elétricos, indústrias petrolíferas e químicas tem facilidade de penetração no organismo desde que haja a exposição a ele por parte do ser vivo.

Este organismo pode eliminá-lo, biotransformá-lo e absorvê-lo.



Dependendo da sua biodisponibilidade no organismo pode gerar em alguns receptores efeitos traduzidos por sinais e sintomas que podem apresentar sérios riscos à saúde conforme foi citado no texto acima.

"Sendo altamente tóxico exige sérias medidas na sua manipulação"



CAPÍTULO V

5. CORROSÃO DAS LIGAS DE FERRO SILÍCIO

5.1. Métodos de Ensaio à Corrosão

Não existe um método padrão ou preferido para efetuar um ensaio de corrosão: o método deve ser escolhido de modo a adaptar-se aos objetivos do ensaio. Os principais tipos de ensaio são, na ordem decrescente de confiabilidade [10-18]:

a) Experiência operacional real, com o equipamento da planta em escala verdadeira, exposto à ação do meio corrosivo;

b) Experiência em equipamento da planta em escala reduzida, em condições industriais ou de planta-piloto;

c) Ensaios com amostras na planta, incluindo laminulas, amostras tensionadas, pontas de resistências elétricas expostas ao meio corrosivo; ou amostras expostas à atmosfera, ao solo, ou à água fresca, salobra ou salina;

d) Ensaios de laboratório com amostra exposta aos líquidos "reais" da planta ou a ambientes simulados;

Os ensaios da corrosão na fábrica ou no campo são importantes para:



a) Escolher o material mais conveniente para resistir a um ambiente particular e estimar a sua durabilidade provável neste ambiente;

b) Estudar a eficiência dos meios de impedir a corrosão.

5.1.1. Ensaio de Corrosão em Fábrica

Nem sempre é prático ou conveniente, investigar os problemas de corrosão no laboratório. Em muitas circunstâncias, é difícil descobrir exatamente as condições do serviço e reproduzi-las exatamente.

Com muitas substâncias naturais a natureza exata do meio corrosivo é incerta e está sujeita a modificações que não são facilmente controladas no laboratório. Em outros casos, a corrosividade de uma solução pode ser grandemente influenciada, ou mesmo provocada exclusivamente, por um constituinte presente em proporção mínima; nestas circunstâncias, a massa deste constituinte presente no volume limitado de solução corrosiva, que pode ser usado no laboratório, seria exaurida pela corrosão no início do ensaio e consequentemente, os resultados sobre um período dilatado de tempo seriam errôneos.

Outra dificuldade que se encontra às vezes no laboratório é a apreciável modificação da natureza corrosiva da solução de ensaio provocada pela



contaminação originada pelos produtos de corrosão. Nestes casos é usualmente preferível executar o programa de ensaios de corrosão expondo os corpos de prova no equipamento operacional nas condições reais de operação. Este procedimento tem a vantagem adicional de possibilitar o ensaio simultâneo de um grande número de amostras; a supervisão técnica necessária é pequena e não é preciso que o investigador conheça a natureza exata da solução corrosiva [18].

Ao efetuar os ensaios de fábrica é preciso instalar os corpos de prova de modo que não fiquem em contato com outros metais ou ligas; isto evita a perturbação do comportamento normal por efeitos galvânicos. É também desejável proteger as amostras de avarias mecânicas.

Não há um tamanho padrão, ou uma forma, para as amostras dos ensaios de corrosão. A preparação da superfície varia com o objetivo do ensaio, mas o polimento a máquina ou lixa nº 120 é usual. As amostras não devem ter as bordas cortadas, devem estar limpas (não deve haver incrustações de tratamento térmico, a menos que façam parte específica do ensaio) e devem ser identificadas por estampagem.

O método de suportar a montagem dos corpos de prova durante o ensaio é importante. A posição preferida é com o eixo maior na horizontal o que evita o pingamento dos produtos de corrosão de uma amostra para a outra.



5.1.2. Duração do Ensaio

Apesar da duração de qualquer ensaio ser determinada pela sua natureza e objetivo, um excelente procedimento para avaliar o efeito do tempo sobre a corrosão de um metal e também sobre a agressividade de um ambiente num ensaio de laboratório foi apresentado por Wachter e Treseder (Chem. Eng. Progr. , julho de 1947, pp 315-326). Esta técnica é denominada a técnica do intervalo planejado [10]. Outros procedimentos que recomendam a remoção dos produtos sólidos da corrosão entre os períodos de exposição não medirão acuradamente as modificações normais da corrosão com o tempo.

Com os materiais que sofrem corrosão severa não há, em geral, necessidade de ensaios demorados para a obtenção de velocidades exatas de corrosão. Apesar desta hipótese ser válida em muitos casos, existem exceções. Por exemplo: o chumbo exposto ao ácido sulfúrico sofre uma corrosão extremamente rápida no início, enquanto se forma um filme protetor; depois a velocidade diminui consideravelmente de modo que a corrosão posterior é praticamente desprezível, mas existente; o fenômeno da formação de filme protetor é observado com diversos materiais resistentes à corrosão e, portanto, os ensaios com estes materiais indicariam taxas de corrosão elevadas e seriam completamente enganosos.



Os ensaios em tempo curto também podem levar a resultados falsos com as ligas que formam filmes passivos como o aço inoxidável. Em condições de fronteira, é preciso um ensaio demorado para haver a ruptura do filme apassivado e o ataque rápido posterior. Por isso, os ensaios de longa duração são consideravelmente mais realistas que os conduzidos em curta duração. Esta afirmação deve ser limitada acrescentando-se que a corrosão não deve avançar ao ponto em que o corpo de prova original ou a sua área sejam drasticamente reduzidos, ou em que o metal seria perfurado.

Quando se esperam velocidades de corrosão moderadas ou baixas, em milésimos de polegada por ano (mpa), a equação seguinte dá a duração sugerida para o ensaio [18]:

2000-

Duração do ensaio(h)=----- (3)

Velocidade de corrosão (mpa)

5.1.3. Limpeza das Amostras do Ensaio

Antes dos corpos de prova serem limpos, é conveniente observar e registrar a sua aparência. São extremamente importantes a localização dos depósitos, as variações nos tipos de depósito e as variações nos produtos de corrosão para avaliar a corrosão localizada, como a alveolar e a de ataque de pilha de concentração.



A limpeza das amostras depois do ensaio é uma etapa vital do procedimento; caso não seja realizada apropriadamente, pode originar resultados falsos. Em geral, a limpeza deve remover todos os produtos de corrosão das amostras com uma remoção mínima do material sadio. Não se pode indicar regras aplicáveis ao processo, em virtude de serem diferentes os tipos de metal e o grau de aderência dos produtos de corrosão.

A limpeza mecânica inclui escovas, raspadores, pincéis, choques e ultra-som. Entre estes métodos é mais usada a escovação com uma escova de pelos duros e um abrasivo moderado; os outros são usados principalmente como suplementos, para remover os produtos de corrosão muito incrustados antes da escovagem final. É preciso cautela para não remover o metal sadio.

A limpeza química implica na remoção do material da superfície da amostra pela dissolução num agente químico apropriado. Antes de outros métodos de limpeza aplicam-se usualmente solventes, como a acetona, o tetracloreto de carbono e o álcool, para remover óleos, graxas e resinas. Algumas substâncias são escolhidas para aplicação a materiais específicos: alguns destes tratamentos de uso geral estão esquematizados nas normas da N.A.C.E. [18].

5.1.4. Avaliação dos Resultados



Depois dos corpos de prova terem sido repesados, devem ser examinados cuidadosamente em busca de pites. Havendo-os, determinam-se as profundidades média e máxima mediante um calibre apropriado ou por meio de um microscópio que é focalizado inicialmente numa borda e depois no fundo do alvéolo.

As profundidades dos pites devem ser em milímetros ou milésimos de polegada para o período real do ensaio; não deve ser interpolada ou extrapolada para milímetros por ano ou milésimos de polegada para milímetros por ano ou milésimos de polegada por ano, ou para qualquer período arbitrário de tempo, pois raramente, talvez nunca, a velocidade de iniciação ou de propagação dos pites seja uniforme.

Devem ser registrados o tamanho, a forma e a distribuição dos pites. Deve-se fazer distinção entre os pites que ocorrem por baixo dos dispositivos de suporte (pilhas de concentração) e os da superfície livre exposta à solução de ensaio.

O corpo de prova deve ser sujeito a um ensaio simples de flexão para determinar se apareceu alguma fragilidade.

Admitindo que não haja corrosão localizada ou interna, ou que ela esteja registrada separadamente no relatório, a velocidade de corrosão ou de penetração pode ser calculada em milímetros por ano [18]:



$$P.P \quad \times \quad 87,6$$

$$mmpa = \frac{(área)(tempo)(densidade \text{ do metal})}{(4)}$$

(área)(tempo)(densidade do metal)

onde:

P.P. = perda de peso, mg;

área = superfície exposta, cm²;

tempo = tempo de exposição, horas;

densidade do metal = peso específico, g/cm³.

As densidades das ligas podem ser obtidas dos produtos ou nos diversos manuais sobre metais.

A seguinte lista de conferência é um guia recomendado para registrar todas as informações e dados importantes:

- Meio corrosivo e concentração (modificações durante o ensaio);
- Volume da solução de ensaio;
- Temperatura (máxima, mínima, média);
- Aeração. (descrever as condições ou técnica);
- Agitação (descrever as condições ou a técnica);
- Tipo do aparelho no ensaio;
- Duração de cada ensaio (início, fim);
- Composição química e denominação comercial dos metais ensaiados.



- Forma e condições metalúrgicas dos corpos de prova;
 - Dimensão exata, forma e área dos corpos de prova;
 - Tratamento usado para preparar os corpos de prova para o ensaio;
 - Número de corpos de cada material ensaiado; indicar as amostras que foram ensaiadas separadamente e as amostras que foram ensaiadas no mesmo vaso;
 - Método usado para limpar as amostras depois da exposição e grandeza de qualquer erro esperado neste tratamento;
 - Perda de peso de cada corpo de prova;
 - Estimativa do ataque com detalhes além do geral, como corrosão por fissuras sob o suporte, distribuição e profundidade dos alvéolos (pites), resultados dos exames ao microscópio e dos ensaios de flexão;
 - Velocidades de corrosão de cada corpo de prova em milímetros por ano;
 - Efeitos das variáveis sobre os ensaios de corrosão.
- É conveniente aplicar um fator de segurança aos resultados obtidos; o fator varia com o grau de confiança na aplicabilidade dos resultados. Ordinariamente, pode ser, considerado razoável um fator entre 3 e 10.



No caso do ferro-silício supõem-se que um filme de sílica seja o responsável pela resistência à corrosão [11].

5.2. Descrição do Ensaio de Corrosão das Ligas de Ferro-Silício

O ensaio de corrosão das ligas de ferro-silício foi realizado com amostras colocadas na planta, reproduzindo fielmente as condições de aplicação futura do material, sendo que o programa de ensaio baseou-se nas condições reais de operação.

Os corpos de prova, em número de cinco, dois de ferro-silício, um de ferro-silício molibdênio e dois de ferro-silício cromo foram avaliados dimensionalmente com a precisão de centésimos de milímetros e pesados em balança eletrônica com precisão de décimos de milésimos de grama. Os dados obtidos são citados nas fichas individuais de cada material que estão colocadas no apêndice.

Uma das superfícies em estado bruto de fusão e uma usinada superficialmente em torno limador, com acabamento como usinado.

A duração prevista do ensaio foi baseada na relação:



Duração do ensaio (h) = ----- (5)

Velocidade de corrosão (mpa)

Segundo catálogo da DURIRON [8], taxa de corrosão para ferro-silício na solução de ácido sulfúrico a 85% de concentração e 140°C varia de 0 a 5 milésimos de polegada por ano. Tomou-se por base o valor de 1,5 mpa e o máximo 5 mpa de corrosão para chegar-se a tempos respectivos de ensaio de 1340 a 400 horas.

Tabela 14 - Plano do teste de corrosão.

Tempo acumulado (dias)	Tempo de Exposição (dias)
1	1
2	1
3	1
6	3
8	2
13	5
18	5
32	14
46	14
60	14
74	14



Como para baixas taxas de corrosão tem-se tempos de ensaio maior, adotou-se o plano de trabalho descrito na Tabela 14, que realiza um total de 1776 horas de teste; acima portanto do tempo mínimo requerido.

A limpeza das amostras antes do ensaio foi feita com escovamento por escova de aço e após desengraxada com solvente (acetona). Após cada período de exposição ao ataque químico a amostra é esfregada com escova de aço macio, lavada com acetona e seca em estufa a 50°C durante 15 minutos. Somente após esta limpeza é que amostra é pesada para avaliação da perda de peso no período de teste.

Após a pesagem a superfície da amostra é observada em microscópio ótico (50x) para avaliação de seu estado geral. Feita a avaliação o material é desengraxado com solvente e colocado no reator para novo período de teste.

As fichas individuais de cada material ensaiado no processo de fabricação colocadas no apêndice, reúnem todas as informações necessárias do material e os resultados obtidos durante o teste.

O coeficiente de segurança utilizado nos resultados obtidos do teste de corrosão (variação de 3 a 10) será igual a 3 tendo em vista que o ensaio foi realizado em condições similares ao seu emprego futuro e também por supor-se que no caso do ferro-silício, um filme de sílica seja o responsável pela resistência à corrosão [11].



5.3. Ensaio de Corrosão

Após a realização do ensaio, pela taxa de corrosão apresentada pelo ferro silício verificou-se que seria necessário um período de testes de 285 horas, sendo a duração inicial pré-fixada 4,7 vezes maior que o tempo necessário, avaliado pela relação:

$$2000$$

Tempo de duração do teste =----- [horas].

mpa

Taxa de corrosão = 7 milésimos de polegada ano.

Logo:

Tempo de duração do teste = 285 horas.

A taxa total de corrosão apresentada pelas amostras durante os 74 dias de teste estão listados na Tabela 15.

Tabela 15 - Taxa de corrosão de 74 dias de teste.

CP nº	Material	Taxa de corrosão(mmpa)
1	Fe-Si	0,00069
2	Fe-Si	0,00131
3	Fe-Si-Mo	0,00845
4	Fe-Si-Cr	0,00426
5	Fe-Si-Cr	0,00134



Pela análise dos dados registrados durante o teste, observa-se que após 18 dias de teste, a velocidade de corrosão cai sensivelmente, como esperado [18] e obteve-se os valores apresentados na Tabela 16 de taxa de corrosão entre o 18º e 74º dias.

Tabela 16 - Taxa de corrosão do 18º ao 74º dias de teste.

Cp nº	Material	Taxa de corrosão(mmpa)
1	Fe-Si	0,00018
2	Fe-Si	0,00018
3	Fe-Si-Mo	0,00337
4	Fe-Si-Cr	0,00108
5	Fe-Si-Cr	0,00018

Comparando-se os resultados verifica-se que os dois corpos de prova de ferro-silício (nºs 1 e 2) apresentam taxas diferentes no início, mas após o 18º dia são bastante próximas ou iguais para o período considerado.

A razão da taxa de corrosão mais elevada para o CP nº 2 no início é uma fratura de um canto do corpo de prova e este local apresenta-se com uma superfície muito rugosa, ocasionando maior perda de material. Após o ataque inicial a perda de material nesta área estabilizou e o corpo de prova nº 2 passou a apresentar taxas de



corrosão semelhantes ao corpo de prova nº 1.

Para os corpos de prova nº 4 e 5 não foi encontrada nenhuma justificativa para a grande variação da taxa de corrosão apresentada durante o teste. São corpos de prova de mesma fusão, mesma composição química, mesma velocidade de resfriamento, mesmo acabamento superficial e mesmas condições de testes.

Sobre esta diferença acentuada da taxa de corrosão do ferro silício cromo, a engenharia da Electro Aço Altona citou que pode ser pela diferença na composição do material do molde, mas difícil de ser comprovada nesta oportunidade.

Fato característico apresentado pelos corpos de prova durante o teste foi o ótimo aspecto desenvolvido pelas superfícies usinadas, que praticamente não apresentaram nenhum indício de corrosão no meio de ensaio, observado em microscópio com aumento de 50x.

Usando um coeficiente de segurança 3, no período do 18º ao 74º dias, tem-se as taxas de corrosão listadas na Tabela 17.

(Procedimento para teste de resistência à corrosão de ferros fundidos de alto silício), foram ensaiados 6 corpos de prova, sendo 3 de ferro silício (EA-101.14) e 3 de ferro silício cromo (EA-101.16). Não foi testado o ferro silício molibdênio (EA-101.15) por não haver corpos de prova disponíveis. Dois corpos de ferro silício cromo foram ensaiados sem serem submetidos ao ataque do meio corrosivo e os outros



Tabela 17 - Taxa de corrosão do 18º ao 74º dia de teste com o coeficiente de segurança 3.

CP nº	Material	Taxa de corrosão(mmpa)
1	Fe-Si	0,00054
2	Fe-Si	0,00054
3	Fe-Si-Mo	0,01011
4	Fe-Si-Cr	0,00324
5	Fe-Si-Cr	0,00054

Portanto, para as ligas de Fe-Si tem-se a necessidade de 1850 anos para haver a corrosão de 1 mm.

Para o Fe-Si-Mo que apresentou a maior taxa de corrosão, necessita-se de 100 anos para haver a corrosão de 1 mm.

5.4. Resistência Mecânica

De acordo com o procedimento previsto na norma ASTM - A 518 M-86 (Procedimento para teste de resistência à corrosão de ferros fundidos de alto silício), foram ensaiados 6 corpos de prova, sendo 3 de ferro silício (EA-101.14) e 3 de ferro silício cromo (EA-101.16). Não foi testado o ferro silício molibdênio (EA-101.15) por não haver corpos de prova disponíveis. Dois corpos de prova um EA-101.14 e um EA-101.15, foram ensaiados sem serem submetidos ao ataque do meio corrosivo e os outros



quatro, dois de cada material, foram expostos ao ataque da solução de ácido sulfúrico a 85% mais álcool etílico a 140°C, durante 504 horas (21 dias).

Os corpos de prova sujeitos ao meio corrosivo apresentaram as perdas de peso citadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Perda de peso no ensaio de corrosão (504 horas) dos corpos de prova submetidos ao ensaio de flexão.

Material	Peso Inicial(g)	Peso Final (g)	Diferença (g)
Fe-Si	1711,90	1710,59	1,31
Fe-Si	1698,29	1697,32	0,97
Fe-Si-Cr	1629,11	1628,01	1,10
Fe-Si-Cr	1708,71	1708,20	0,51



Submetidos ao teste de flexão, os corpos de prova apresentam os valores de carga e de deflexão listados na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores de carga e deflexão dos corpos de prova submetidos ao ensaio de flexão.

Material	Carga (kg)	Deflexão (mm)

S/ Ataque		
Fe-Si	680	0,88
Fe-Si-Cr	700	1,20
C/ Ataque		
Fe-Si	700	0,82
Fe-Si	670	0,86
Fe-Si-Cr	550	0,92
Fe-Si-Cr	560	0,99

Baseado nos valores apresentados no ensaio de flexão, determinou-se o valor do módulo de ruptura ou resistência ao dobramento, que é o valor máximo da tensão de tração na fibras externas do corpo de prova e calculado pela expressão [19]:



$$Mr = \frac{2,546 Q_{max} L}{D^3} ; (6)$$

onde:

Mr: módulo de ruptura, kgf/mm²;

Q_{max}: carga máxima, kgf;

L: distância entre os apoios, mm;

D: diâmetro da barra, mm.

Para a pior situação, que foi o rompimento do corpo de prova de ferro silício cromo com uma carga de 550 kg, tem-se um módulo de ruptura de

$$2,546 \times 550 \times 305$$

$$Mr = \frac{2,546 \times 550 \times 305}{30,9^3}$$

$$Mr = 14,47 \text{ kgf/mm}^2 \quad \text{ou}$$

$$Mr = 144,7 \text{ MPa}$$

Comparando este valor com o valor utilizado de resistência à tração (98 MPa) do capítulo VI, projeto do reator, vê-se que é 1,46 vezes maior. Portanto o valor utilizado no cálculo é um valor seguro.



5.5. Conclusão

Conclui-se que quanto ao aspecto corrosivo as ligas de ferro-silício são compatíveis para o trabalho com a solução de ácido sulfúrico a 140°C , 85% de concentração e álcool etílico, sem a necessidade de prever-se sobreespessura de corrosão nos projetos de equipamentos feitos destes materiais e que a taxa de corrosão das ligas de Fe-Si são desprezíveis nas condições em que foram testadas, haja visto que na pior condição, para corroer 1 mm há a necessidade de pelo menos 100 anos.

Pela diferença dos resultados apresentados no teste de flexão (carga e deflexão) e pela mínima perda de material no ensaio de corrosão, os corpos de prova basicamente não tiveram sua resistência mecânica alterada quando submetidos ao ataque do meio corrosivo por 504 horas e em todos os testes os valores de carga e deflexão obtidos foram superiores aos valores de carga mínima (4090 N) e deflexão mínima (0,66 mm) requeridos para aprovação do material constante da norma ASTM A 518. Portanto, pelo verificado nada impede a aplicação das ligas de ferro-silício na solução testada.



CAPÍTULO VI

6. PROJETO DO REATOR E ENCAMISADO.

6.1. Informações de Projeto

O reator de chumbo atualmente utilizado tem um diâmetro de 1,20 m e uma altura de 1,32 m, conforme Fig. 16.

O volume da solução ácida utilizado atualmente deve permanecer (aprox. 300 l), mas será dividido por dois reatores que terão somadas as áreas de evaporação, a mesma superfície de evaporação do reator atual.

O aquecimento do reator atual que é por vapor circulante em serpentinas de chumbo imersas na solução ácida será substituído por aquecimento do encamisado, por haver dificuldades técnicas de construção das serpentinas de ferro-silício nas dimensões desejadas.

A superfície externa da camisa do reator será isolada com fibra de vidro coberta com papel aluminizado para diminuir a troca de calor com o meio ambiente e economizar-se energia térmica.

O vapor fornecido para aquecimento da camisa do reator é saturado, estando a uma pressão máxima de 4 kgf/cm² e temperatura aproximada de 143°C [21]. Mesmo que haja descontrolo do aquecimento do reator, a temperatura do mesmo não ultrapassará os 145°C, pois há uma válvula de segurança, regulada para abrir a uma pressão de 4,05



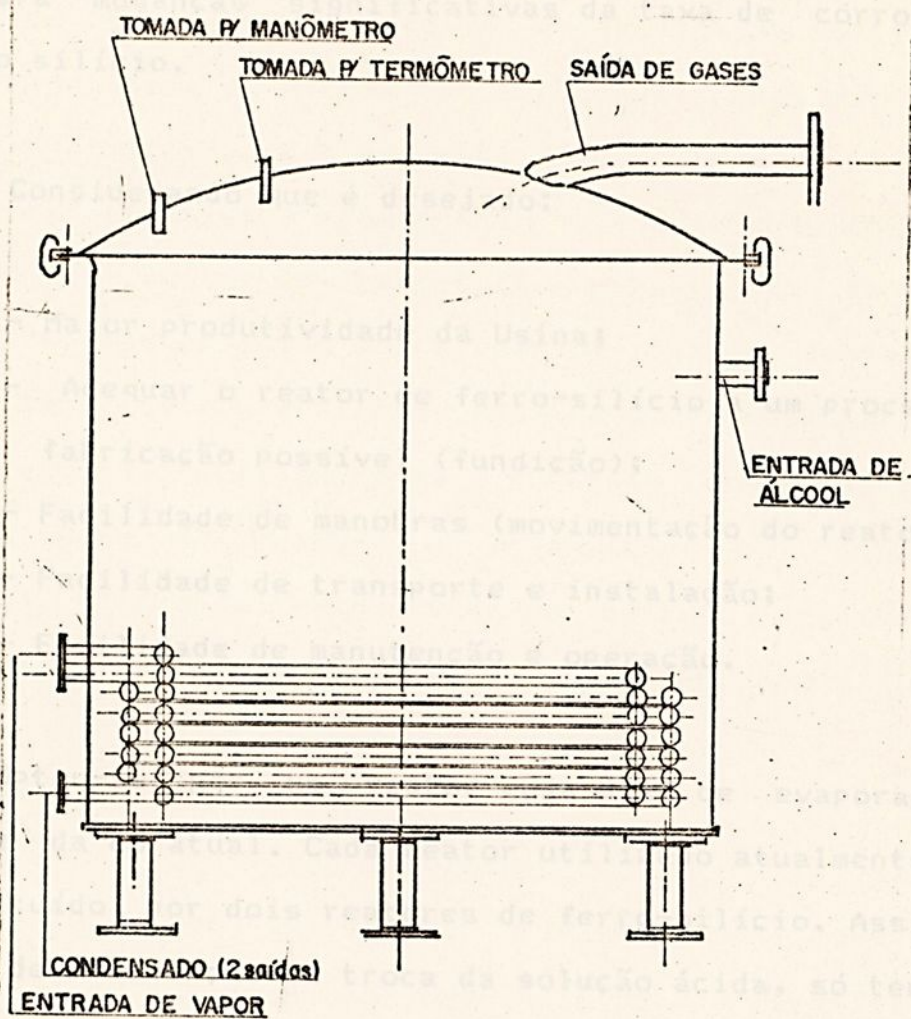


Fig. 16 - Reator em chumbo, projetado em 1907.

kgf/cm² instalada na linha de fornecimento de vapor para o reator. Este aumento da temperatura de trabalho não causará mudanças significativas da taxa de corrosão do ferro silício.

Considerando que é desejado:

- Maior produtividade da Usina;
- Adequar o reator de ferro-silício a um processo de fabricação possível (fundição);
- Facilidade de manobras (movimentação do reator);
- Facilidade de transporte e instalação;
- Facilidade de manutenção e operação.

Optou-se por um reator cuja área de evaporação é metade da do atual. Cada reator utilizado atualmente será substituído por dois reatores de ferro-silício. Assim no caso de manutenção ou troca da solução ácida, só tem-se a paralização de 50% da linha de fabricação de éter.

A altura interna foi reduzida de 1,10 m para 1,00 m e o diâmetro de 1,20 m para 0,87 m, obtendo-se assim uma peça com dimensões adequadas para a fundição.

6.2. Projeto do Reator



O projeto do reator foi desenvolvido em conjunto com a Engenharia da Electro Aço Altona. Os dados técnicos, memoriais de cálculo e detalhes de fabricação utilizados pela Engenharia da Altona não serão publicados por serem de uso restrito daquela Empresa.

Este trabalho acompanhou o desenvolvimento do projeto do reator em ferro-silício através da simulação de um modelo definido por elementos finitos implantados no sistema de computação da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, utilizando-se o programa "ELFIN" (Programa de Avaliação de Tensões e Deformações por Elementos Finitos) e também pelo método de cálculo previsto na Seção VIII, Divisão I, Volume I e II da ASME [20].

6.2.1. Programa ELFIN

Optou-se por um modelo bidimensional, devido à limitação do número de nós possíveis para a capacidade de processamento da máquina, aceitando este programa que seja dada uma profundidade à peça.

O carregamento das forças em cada nó foi avaliado em função da área sujeita à pressão de trabalho, distribuída igualmente entre os nós adjacentes.



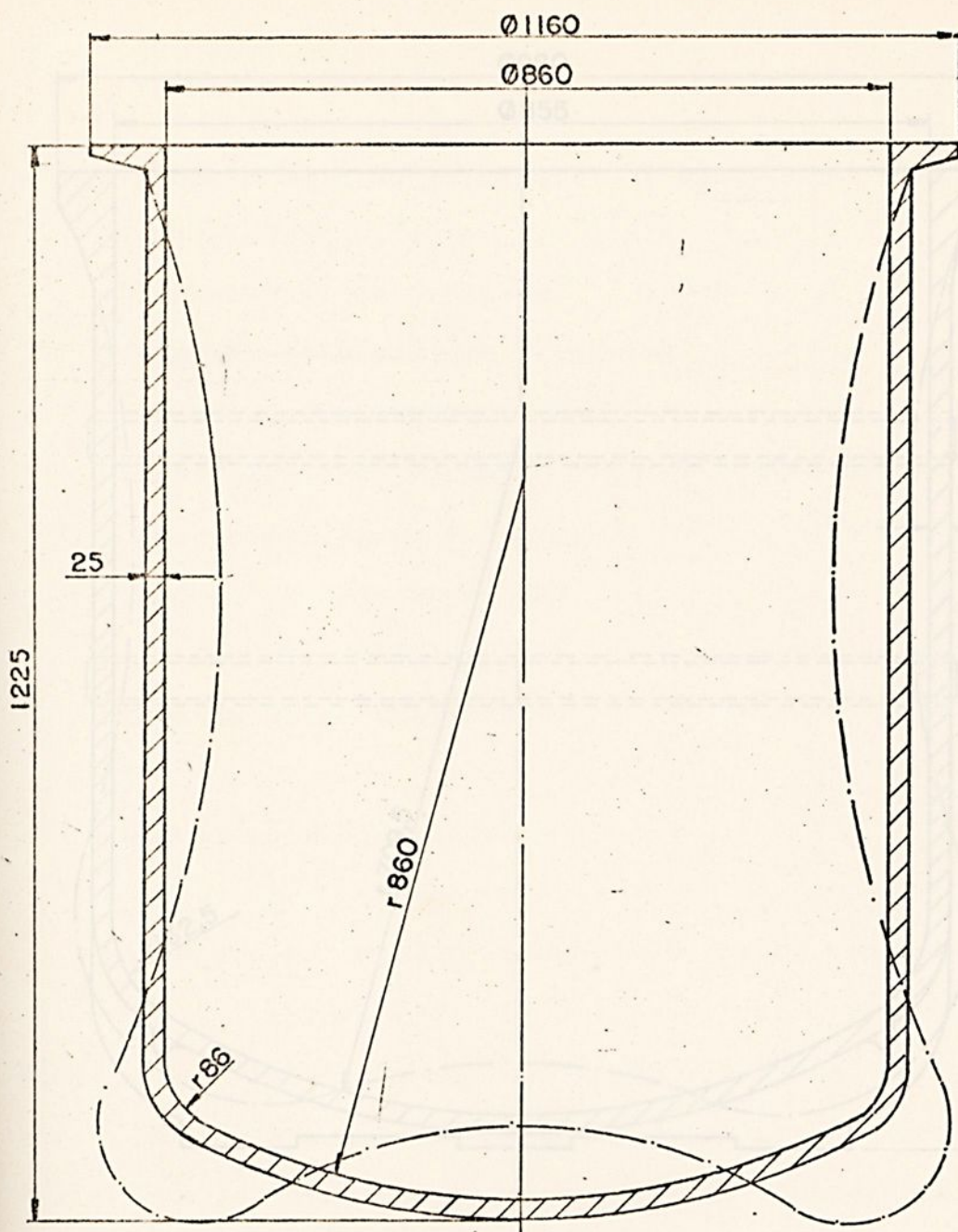


Fig. 17 - Modelo nº 1 com sua curva elástica,
(Fundo Torrisférico).

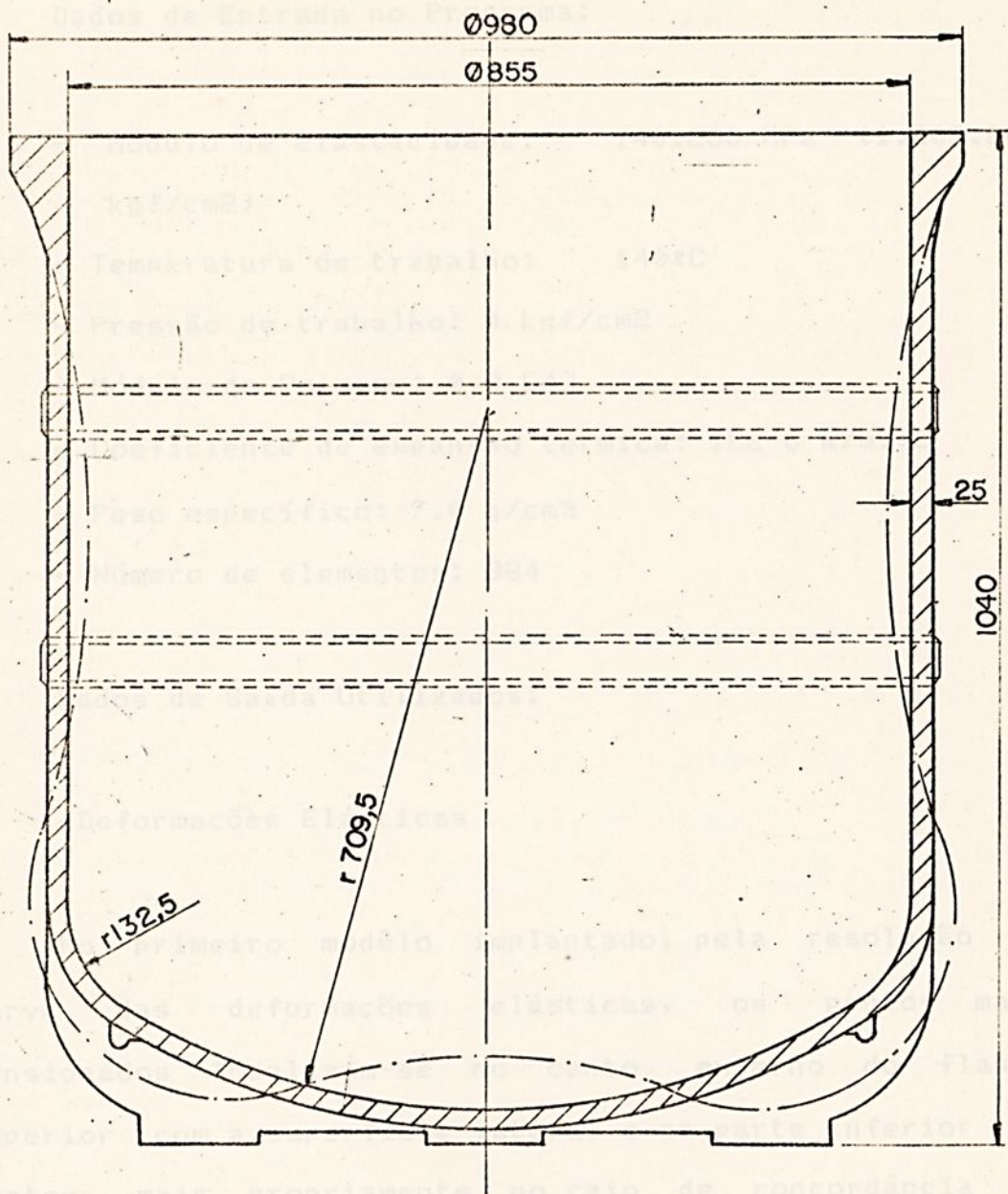


Fig. 18 - Modelo nº 2 com sua curva elástica,
(Fundo Elíptico).

Dados de Entrada no Programa:

- Módulo de elasticidade: 140.280 MPa (1.402.800 kgf/cm²)
- Temperatura de trabalho: 140°C
- Pressão de trabalho: 4 kgf/cm²
- Módulo de Poisson: 0,3 [4]
- Coeficiente de expansão térmica: 12E-6 m/m.°C
- Peso específico: 7.0 g/cm³
- Número de elementos: 884

Dados de Saída Utilizados:

-Deformações Elásticas

No primeiro modelo implantado, pela resolução da curva das deformações elásticas, os pontos mais tensionados localizam-se no canto externo do flange superior com a superfície lateral e na parte inferior do reator, mais propriamente no raio de concordância da superfície lateral com o raio do fundo do reator, que é torrisférico.

A fim de amenizar a concentração de tensão, nestes dois pontos foi formulado um segundo modelo, no qual colocou-se uma nervura circunferencial no fundo do reator, unindo os maçalotes de fundição e duas nervuras circunferenciais na parede lateral para enrigecer a



estrutura, permitindo menores deformações elásticas do reator. O perfil do fundo também foi alterado, de torrisférico para elíptico, proporcionando melhor distribuição dos esforços provenientes da pressão de vapor que atuam no fundo deste.

A colocação das nervuras e a mudança do perfil do fundo fizeram com que as deformações elásticas diminuíssem sensivelmente, comparadas com o primeiro modelo, apresentando curvas com mudanças de concavidade mais suaves.

Ressalte-se que os modelos formulados apresentam uma espessura de parede de 25 mm e em nenhum ponto as curvas de deformação elástica foram rompidas, indicando esforços superiores às suas respectivas capacidades.

Face à diminuição da deformação da curva elástica com o arredondamento do fundo do reator, adotou-se um perfil hemisférico (calota esférica) para o mesmo, implicando isto, numa espessura menor de parede, face à melhor distribuição dos esforços.

6.2.2. Seção VIII, ASME

O dimensionamento realizado pela Seção VIII, Divisão I, Volumes I e II da ASME [20], apresenta a memória de cálculo a seguir descrita:



a) Requisitos para vasos de pressão fabricados de ferro fundido, de acordo com a UCI-3, não apresenta limitações para a pressão e temperatura de projeto utilizadas.

Conforme consta da UCI-99 (' Teste Hidrostático Padronizado), a pressão de teste para os ferros fundidos deve ser de duas vezes a pressão máxima de trabalho admissível (PMTA), ou seja 0,8 MPa (8 kgf/cm²).

Portanto a pressão de projeto considerada nos cálculos será de 0,8 MPa e a temperatura de projeto 143°C.

b) A espessura do casco e tampo sujeitas à pressão externa está de acordo com o que prevê as UG-24, UG-28, UG-29, UG-32 e UG-33 [20].

Adotada a simbologia abaixo:

A = fator determinado na Fig. 5 - UG-28.0;

B = fator determinado na Fig. 5 - UCI- 28, MPa;

D = diâmetro interno da parte cilíndrica (saia) do tampo, mm;

Do = diâmetro externo do anel do casco cilíndrico, mm;

E = módulo de elasticidade do material na temperatura de projeto, MPa;

E' = menor eficiência para qualquer junta soldada;

L = comprimento total do anel, mm;

P = pressão externa de projeto, Mpa;



P_a = valor calculado da pressão externa de trabalho admissível, em função do valor atribuído para t , MPa;

t_1 = espessura mínima requerida do casco cilíndrico ou tubo, exclusive a margem de corrosão, mm;

t_2 = espessura mínima requerida do tampo, exclusive a margem de corrosão, mm;

R_o = raio externo na condição corroída do tampo hemisférico, mm;

S = valor da tensão máxima admissível, MPa.

donde:

$D_o = 910$ mm,

$E = 140280$ MPa,

$E' = 1$ (não há soldas),

$L = 582$ mm,

$L' = 420$ mm,

$P = 0,80$ MPa,

$S = 8,82$ MPa.

O valor da tensão máxima admissível (S), foi tomado em função do menor valor de resistência à tração (98 MPa) indicado pela Electro Aço Altona para ferro-silício, devido à espessura da peça levando-se em conta o coeficiente de segurança 10, adotado na tabela UCI-23, para as tensões máximas admissíveis nos ferros fundidos



empregados em temperaturas até 225°C e como o valor da tensão máxima admissível para o ferro silício não consta da referida tabela, foi adotado este procedimento. Também foi multiplicado por 0,9 (fator de qualidade do ferro fundido [UG-24]).

Quanto à variação da resistência mecânica do ferro silício com a elevação de temperatura não foi encontrada nenhuma informação. Observou-se que a ASME [20] na UCI-23, utiliza os mesmos valores de tensão admissível para os ferros fundidos, sejam utilizados até temperaturas de 225°C ou até 350°C . Como a temperatura de trabalho é de 140°C , não foi feita nenhuma diminuição do valor da resistência mecânica do ferro silício devido ao aumento de temperatura.

Também não foi encontrada nenhuma informação que diferenciasses os valores da resistência mecânica para as diversas ligas de ferro silício. Adotou-se o mesmo valor para as três ligas testadas.

- Cálculo da espessura de parede do casco.

Para $t_1 = 7$ mm tem-se:

$L / D_o = 0,639,$

$D_o / t = 130.$

Da Fig. 5 - UG0.28.0, tem-se:

$A = 0,00105.$



da Fig. 5 - UCI-28, tem-se:

$$B = 100 \text{ MPa.}$$

Como

$$P_a = 4B / (3 (D_o / t)), \quad (17)$$

tem-se:

$$P_a = 1,02 \text{ MPa.}$$

Como $P_a > P$, de acordo com a UG-28, atende-se às condições de projeto.

- Cálculo da espessura do tampo.

Adotado o tampo hemisférico, por apresentar melhor distribuição dos esforços provocados pela pressão do vapor e apresentar também menor deformação elástica que os padrões torrisférico e elípticos avaliados no programa ELFIN.

Conforme UG-32, UCI-33 e UCI-32,

$$t_2 = (P \times L') / ((2 \times S \times E') - (0,2 \times P)), \quad (8)$$

$$t_2 = 19,22 \text{ mm.}$$

Estruturalmente 19,22 mm atende aos esforços oriundos da pressão do vapor. Sendo a taxa de corrosão desprezível, conforme avaliação contida no capítulo VI, será acrescentado 1 mm como sobreespessura de corrosão, mais 2 mm para haver usinagem superficial a fim de dar acabamento à superfície da peça que entrará em contato com a solução ácida.



Tem-se então:

$t_2 = 22,22 \text{ mm.}$

6.2.3. Conclusão Sobre a Espessura da Parede do Reator

A Electro Aço Altona posicionou-se que devido a problemas de fundição (solidificação prematura) que poderiam originar-se na alimentação do fundido, a espessura da peça não deve ser menor que 25 mm.

Como, com 22 mm todas as necessidades do fundido, no tocante aos esforços mecânicos, corrosão e sobreespessura para usinagem estão satisfeitos, julgou-se não haver inconveniente no atendimento à solicitação realizada pela Eletro Aço Altona. Baseado no exposto acima e nos itens anteriores, conclui-se que o reator deve ser construído com uma espessura de 25 mm, reforçado na junção de seu fundo hemisférico por nervura circunferencial que permitirá menor deformação elástica, diminuindo as tensões solicitantes na parte superior externa do flange e na concordância da superfície lateral com o fundo do reator.

A razão de uso de um coeficiente de segurança elevado deve-se à fragilidade do ferro-silício e principalmente à sua baixa resistência à tração comparado com sua resistência à compressão, citado no capítulo III.



6.2.4. Desenho do Reator em Ferro Silício

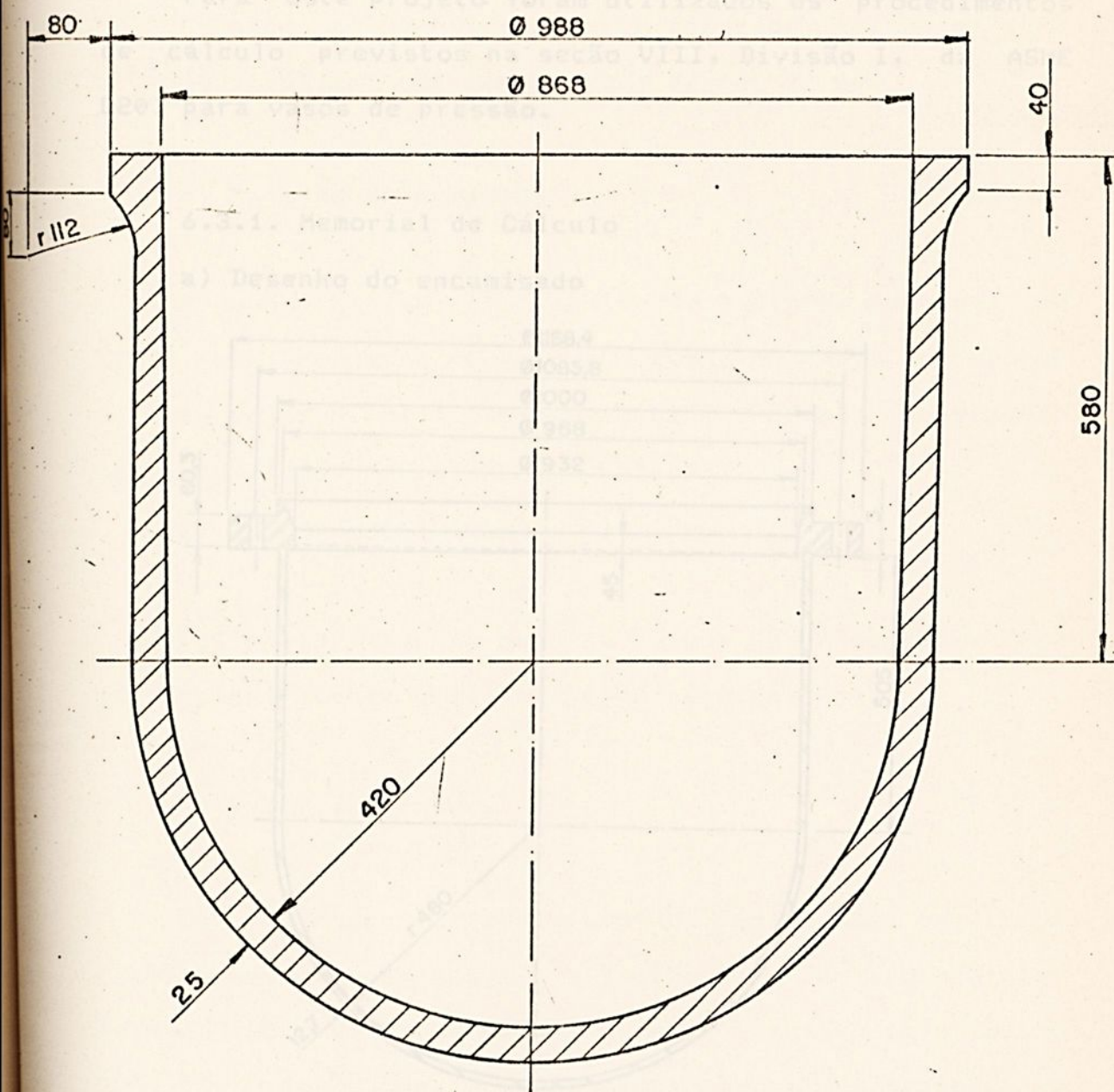


Fig. 19 - Reator de ferro-silício.

6.3. Projeto da Camisa

Para este projeto foram utilizados os procedimentos de cálculo previstos na seção VIII, Divisão I, da ASME [20] para vasos de pressão.

6.3.1. Memorial de Cálculo

a) Desenho do encamisado

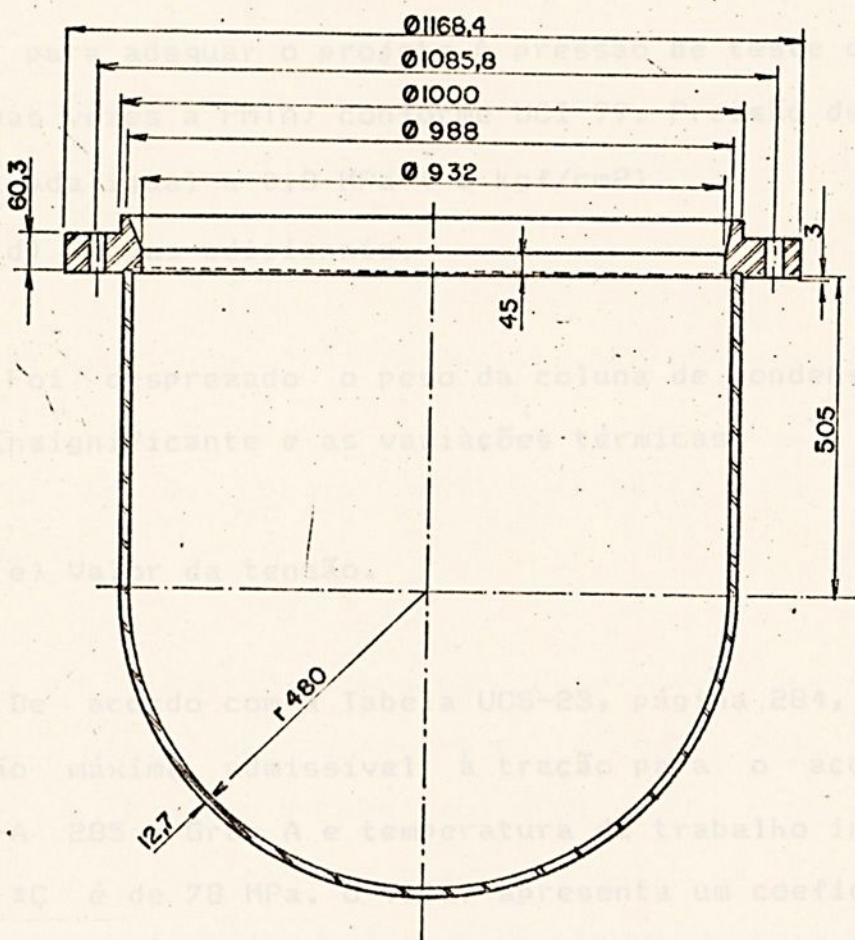


Fig. 20 - Camisa do reator de ferro-silício.

b) Temperatura de projeto.

Segundo a UG-20, com vapor saturado, fornecido a 4 kgf/cm², implica numa temperatura de 143 °C [21].

c) Pressão do projeto.

Pressão máxima de trabalho de 0,4 MPa, majorada em 100% para adequar o projeto à pressão de teste do reator (duas vezes a PMTA) conforme UCI 99. Pressão de projeto utilizada igual a 0,8 MPa (8 kgf/cm²).

d) Cargas adicionais.

Foi desprezado o peso da coluna de condensado, por ser insignificante e as variações térmicas.

e) Valor da tensão.

De acordo com a Tabela UCS-23, página 284, valor de tensão máxima admissível à tração para o aço carbono ASTM-A 285 - Grau A e temperatura de trabalho inferior a 325 °C é de 78 MPa. O valor apresenta um coeficiente de segurança 2,1 em relação ao seu limite de resistência ao escoamento (165 MPa).



Foi escolhido o aço ASTM-A 285 - Grau A por ser um aço aplicado na construção de vasos de pressão e ser encontrado comercialmente, além de ter uma porcentagem de carbono baixa (0,17% C) que facilitará a construção da camisa no tocante as juntas soldadas [9]. As juntas serão soldadas de topo, com uma eficiência de 0,70 conforme consta da Tabela UW-12 [20].

f) Corrosão.

Vasos de pressão em aço carbono para serviços com vapor deve ser utilizada um sobreespessura de corrosão de 1,5 mm [9].

g) Espessura do casco sujeito à pressão interna.

De acordo com a UG-27, será adotada a simbologia abaixo:

t = espessura mínima requerida para o casco,
exclusive a margem de corrosão, mm;

P = pressão de projeto, MPa;

R = raio interno do anel do casco em consideração,
antes do acréscimo da margem de corrosão, mm;

S = valor da tensão máxima admissível, MPa;



E = eficiência apropriada da junta em cascos cilíndricos.

Donde:

$$R = 480 \text{ mm},$$

$$P = 0,8 \text{ MPa},$$

$$S = 78 \text{ MPa},$$

$$E = 0,7.$$

- Tensão circunferencial, junta longitudinal:

$$t_1 = (P \times R) / ((S \times E) - (0,6 \times P)) \quad (9)$$

$$t_1 = 7,09 \text{ mm},$$

$$t_1 = 7,09 + 1,5 = 8,6 \text{ mm}.$$

- Tensão longitudinal, junta circunferencial:

$$t_2 = (P \times R) / ((2 \times S \times E) + (0,4 \times P)), \quad (10)$$

$$t_2 = 3,50 \text{ mm},$$

$$t_2 = 3,50 + 1,5 = 5,00 \text{ mm}.$$

$$(t_2 < t_1)$$

h) Espessura de tampos conformados, pressão no lado côncavo:



De acordo com UG-32, será adotada a simbologia abaixo:

t = espessura mínima requerida do tampo após a conformação, exclusive a margem de corrosão, mm;

P = pressão de projeto, MPa;

D = diâmetro interno do tampo, mm;

S = valor da tensão máxima admissível, MPa;

E = menor eficiência de qualquer junta do tampo;

L = raio interno da calota esférica, mm;

De acordo com a Tabela UW-12 tem-se $E = 0,50$.

Cálculo da espessura do tampo hemisférico:

$P = 0,80$ MPa,

$D = 960$ mm,

$S = 78$ MPa,

$E = 0,50$,

$L = 480$ mm,

$t = (P \times L) / ((2 \times S \times E) - (0,2 \times P))$, (11)

$t = 4,93$ mm, mais sobre espessura de corrosão,

$t = 4,93 + 1,5 = 6,43$ mm.



i) Adotando uma sobreespessura de corrosão igual a 5,6 mm para o aço carbono ASTM-A-285, Gr A, como medida de segurança à violenta ação corrosiva da solução ácida, caso haja vazamento desta do reator para a camisa, possibilitando o tempo mínimo necessário (2 horas) para o desligamento do reator e tomada de medidas adequadas à segurança antes que a espessura da camisa seja comprometida estruturalmente.

6.3.2. Conclusão sobre a espessura de parede da camisa do reator.

Em função do que foi apresentado nos itens anteriores conclui-se que deve ser adotada a espessura de 12,7 mm (1/2") para a confecção do encamisado por tratar-se de chapa comercial e ter-se mantido uma sobreespessura de corrosão de 5,6 mm na região mais solicitada (junta longitudinal), conforme Fig. 21.

O vazamento de ácido para a camisa do reator pode ser detectado através da análise do Ph do condensado que sai pelo purgador de cada reator (pequenas quantidades) ou pela perda do controle da reação de fabricação do éter sulfúrico, com conseqüente elevação da temperatura devido à entrada de água em contato com a solução ácida.



O coeficiente de segurança 2 ao escoamento mais a sobreesspessura de corrosão serão responsáveis por suportar também choques externos que o equipamento venha sofrer, sem que hajam danos ao corpo do reator.

6.3.3. Desenho da camisa do reator em aço carbono ASTM A-285-Grau A:

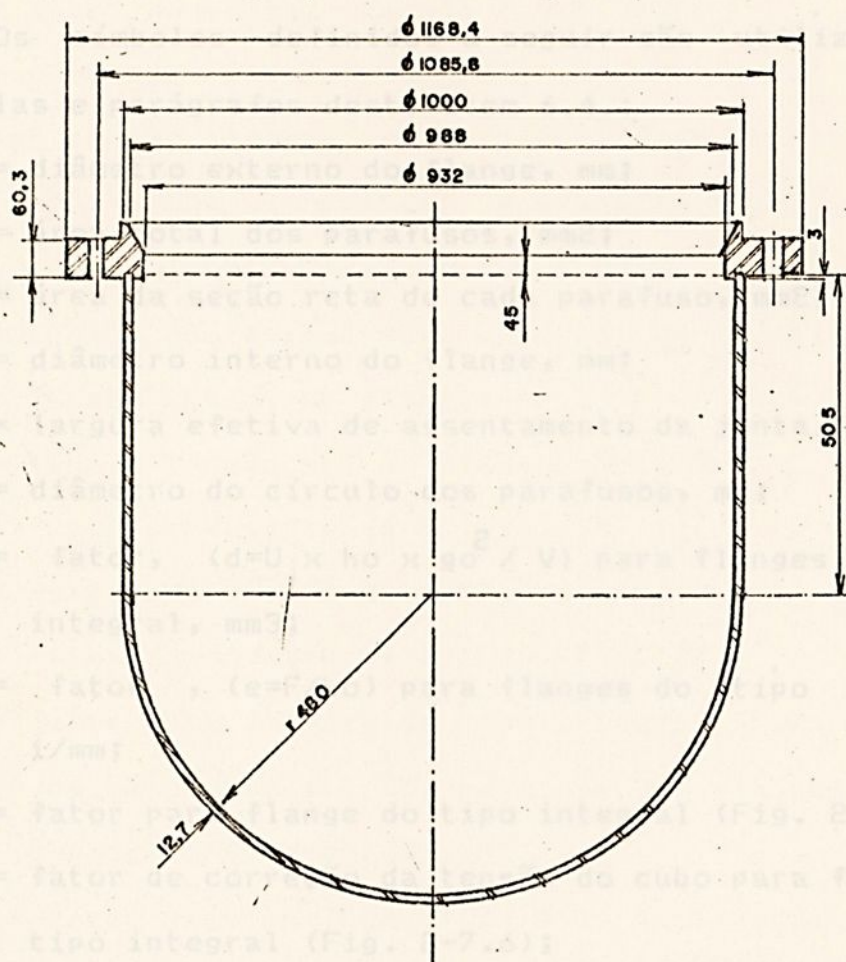


Fig. 21 - Camisa do reator de ferro-silício.

6.4. Cálculo do Flange

O cálculo do flange foi baseado na Seção VIII, Divisão I, Volume II, Apêndice 2 da ASME [20] e nas normas ANSI B 16.5 e B 16.1, Flanges e Conexões Flangeadas.

Os símbolos definidos a seguir são utilizados nas fórmulas e parágrafos deste item 6.4.:

- A = diâmetro externo do flange, mm;
- A1 = área total dos parafusos, mm²;
- A2 = área da seção reta de cada parafuso, mm²;
- B = diâmetro interno do flange, mm;
- b = largura efetiva de assentamento da junta, mm;
- C = diâmetro do círculo dos parafusos, mm;
- d = fator, $(d=U \times h_o \times g_o^2 / V)$ para flanges do tipo integral, mm³;
- e = fator, $(e=F/h_o)$ para flanges do tipo integral, 1/mm;
- F = fator para flange do tipo integral (Fig. 2-7.2);
- f = fator de correção da tensão do cubo para flanges do tipo integral (Fig. 2-7.6);
- G = diâmetro da linha de reação da carga na junta, (Tabela 2 - 5.2), mm;



g_o = espessura do cubo na extremidade menor, mm;
 g_1 = espessura do cubo na parte posterior do flange, mm;
 h_o = fator ($h_o = B \times g_o^{0,5}$), mm;
 K = relação entre os diâmetros externos e interno do flange;
 L = fator ($L = (t \times e + 1) / T + t^3 / d$);
 M_o = momento atual atuando no flange, nas condições de operação, N.mm;
 m = fator de junta, (Tabela 2.5.1.);
 N = número de parafusos;
 S_f = tensão admissível de projeto para material do flange, na temperatura de projeto, MPa;
 S_h = tensão longitudinal no cubo, MPa;
 S_p = tensão admissível para material do parafuso, MPa;
 S_r = tensão radial no flange, MPa;
 S_t = tensão tangencial no flange, MPa;
 T = fator dependente de K (Fig. 2-7.1);
 t = espessura do flange, mm;
 U = fator dependente de K (Fig. 2-7.1);
 V = fator para flanges do tipo integral (Fig. 2-7.3);
 W = carga de projeto dos parafusos do flange, para as condições de operação, N;
 W_{m1} = carga mínima requerida dos parafusos, para as condições de operação, N;
 W_{m2} = carga mínima requerida dos parafusos para assentamento da junta, N;



Y = fator dependente de K (Fig. 2-7.1);

y = carga unitária de assentamento da junta, MPa;

Z = fator dependente de K (Fig. 2-7.1).

6.4.1. Memória de Cálculo

A carga mínima requerida nos parafusos, para as condições de operação (resistência à pressão e assentamento da junta) é calculada pelas expressões (1) e (2) do item 2.5 do apêndice 2,[20].

$$G = 950,$$

$$P = 0,8 \text{ MPa},$$

$$b = 25 \text{ mm},$$

$$M = 0,5 \text{ (elastômero plano)},$$

$$y = 0,$$

$$(1) \quad Wm1 = 0,785 \times G^2 \times P + (2 \times b \times 3,14 \times G \times m \times P), \quad (12)$$

$$Wm1 = 0,785 \times 950^2 \times 0,8 + (2 \times 25 \times 3,14 \times 950 \times 0,5 \times 0,8),$$

$$Wm1 = 626430 \text{ N}.$$

$$(2) \quad Wm2 = 3,14 \times b \times G \times y, \quad (13)$$

$$Wm2 = 3,14 \times 25 \times 950 \times 0,$$

$$Wm2 = 0 \text{ N}.$$



Logo a carga de projeto dos parafusos do flange é igual à carga mínima dos parafusos para as condições de operação, $W = 626430 \text{ N}$.

Utilizando-se 16 parafusos de aço carbono ASTM A-193 B 5 (Tabela UCS-2.3), cuja tensão admissível de projeto é de 139 MPa, necessita-se de uma área de seção reta igual a

$$A1 = W / Sp, \quad (14)$$

$$A1 = 626430 / 139,$$

$$A1 = 4507 \text{ mm}^2.$$

Logo

$$A2 = A1 / N, \quad (15)$$

$$A2 = 4507 / 16,$$

$$A2 = 281,7 \text{ mm}^2.$$

O parafuso, rosca métrica, que mais se aproxima da seção reta solicitada é o M 24, com uma seção reta de 307 mm², já que o M 22 tem sua área de seção reta igual a 268 mm² e não atende ao solicitado.

Conforme consta do item 2.8 do apêndice 2 [20] as tensões no flange não devem exceder:



- (a) a tensão longitudinal no cubo (S_h), não deve exceder a $1,5 S_f$ para os aços carbono;
- (b) a tensão radial no flange (S_r) não deve ser maior do que S_f ;
- (c) a tensão tangencial no flange (S_t) não deve ser maior do que S_f ;
- (d) o valor $(S_h + S_r) / 2$ não deve ser maior do que S_f e também o valor $(S_h + S_t) / 2$ não deve ser maior que S_f .

Para o cálculo das tensões tem-se que conhecer o momento das forças que atuam no flange:

$$C = 1050 \text{ mm,}$$

$$G = 960 \text{ mm,}$$

$$W = 626430 \text{ N,}$$

$$M_o = W (C - G) / 2, \quad (16)$$

$$M_o = 626430 (1050 - 960) / 2,$$

$$M_o = 28.189.350 \text{ N.mm.}$$

A tensão admissível de projeto (S_f) para o material do flange é de 126 MPa, utilizando um coeficiente de segurança 2 no escoamento para o aço carbono A 181 - 59 T Gr. II [22] para uso em temperaturas normais.

Para atender aa condição citada em (a) adota-se $S_h = S_f$ para calcular a espessura do flange.



Do item 2.7 do apêndice 2 [20] tem-se:

$$Sh = FxMo / (Lx g_1^2 x B), \quad (17)$$

E

$$L = f x Mo / (Sh x g_1^2 x B). \quad (18)$$

Como:

$$B = 930,$$

$$f = 1,$$

$$g_1 = 15,8 \text{ mm},$$

$$Mo = 28189350 \text{ N.mm},$$

$$Sh = 126 \text{ MPa}.$$

Temos:

$$L = 0,96.$$

Sendo:

$$L = (t x e + 1) / T + (t^3 / d), \quad (19)$$

$$k = A / B, \quad (20)$$



$$e = F / h_o, \quad (21)$$

$$h_o = (B \times g_o)^{0,5}, \quad (22)$$

$$d = U \times h_o \times g_o^2 / V, \quad (23)$$

$$e = 12,33 \times 40,2 \times 0,0075 + 1 = 28189330 / (0,96 \times$$

$$A = 1168 \text{ mm},$$

$$B = 930 \text{ mm},$$

$$e = 0,0075 \text{ /mm},$$

$$d = 550016 \text{ mm}^3,$$

$$F = 0,908,$$

$$g_o = 15,8 \text{ mm},$$

$$h_o = 121,2 \text{ mm},$$

$$K = 1,25,$$

$$U = 10,$$

$$V = 0,5501,$$

$$Y = 8,5,$$

$$Z = 4,5.$$

Então:

$$0,96 = ((t \times 0,0075 + 1) / 1,8) + (t^3 / 550016)$$



e o valor de $t = 48,2$ mm atende à equação para
 $S_h = S_f = 126$ Mpa.

Verificação da condição (b):

$$S_r = (1,33 \times t \times e + 1) \times M_o / (L \times t \times B), \quad (24)$$

$$S_r = (1,33 \times 48,2 \times 0,0075 + 1) \times 28189350 / (0,96 \times 48,22 \times 930),$$

$$S_r = 20,12 \text{ MPa.}$$

Verificação da condição (e):

$$S_t = (y \times M_o / (t \times B)) - Z \times S_r, \quad (25)$$

$$S_t = (8,5 \times 28189350) / (48,2 \times 930) - 4,5 \times 20,12,$$

$$S_t = 20,36 \text{ Mpa.}$$

Verificação da condição (d)

$$(S_h + S_r) / 2 \leq S_f, \quad (26)$$

$$(126 + 20,12) / 2 \leq 126,$$



$$73,06 \text{ Mpa} < 126 \text{ Mpa},$$

e

$$(S_h + S_t) / 2 < = S_f,$$

(27)

$$(126 + 20,36) / 2 < = 126,$$

$$73,18 \text{ MPa} < 126 \text{ Mpa}.$$

Logo, como todas as condições são atendidas, um flange com a espessura de 48,2 mm atende aos esforços de projeto.

Adotando-se uma sobreespessura de corrosão para aço carbono de 1,5 mm, a espessura do flange ficará com 51,2 mm.

6.4.2. Conclusão Sobre a Espessura do Flange

Face às dimensões do flange e à facilidade de fabricação da camisa visando diminuir a perda de material na fabricação do mesmo, será adotado no projeto um flange comercial sobreposto, da classe 150 lbs (até 10 kgf/cm²), de 36" de diâmetro e 60,3 mm de espessura, padrão ANSI B. 16.1, com usinagem especial nas dimensões do projeto conforme será mostrado na figuras 20 e 21.



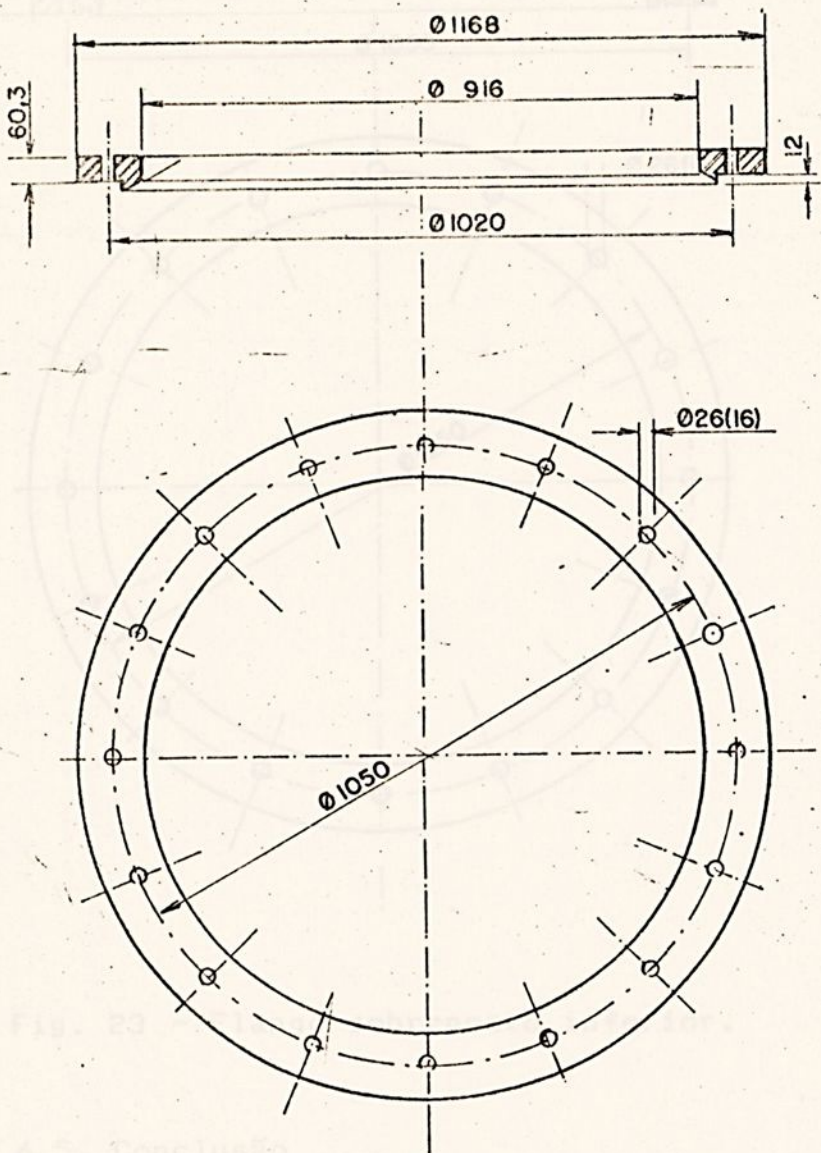


Fig. 22 - Flange sobreposto superior.

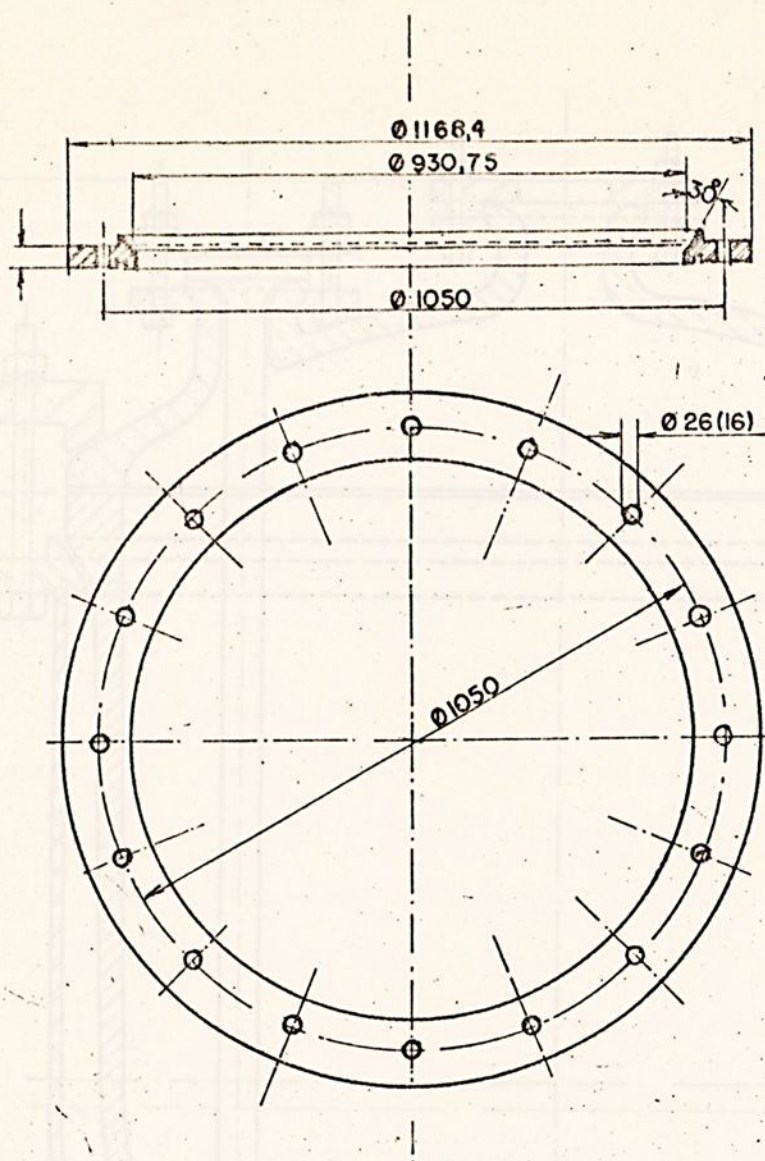


Fig. 23 - Flange sobreposto inferior.

6.5. Conclusão

Face ao exposto neste capítulo, apresenta-se a seguir o desenho referente ao projeto do conjunto reator de ferro silício e encamisado de aço carbono.

Fig. 24 - Desenho do conjunto do reator.

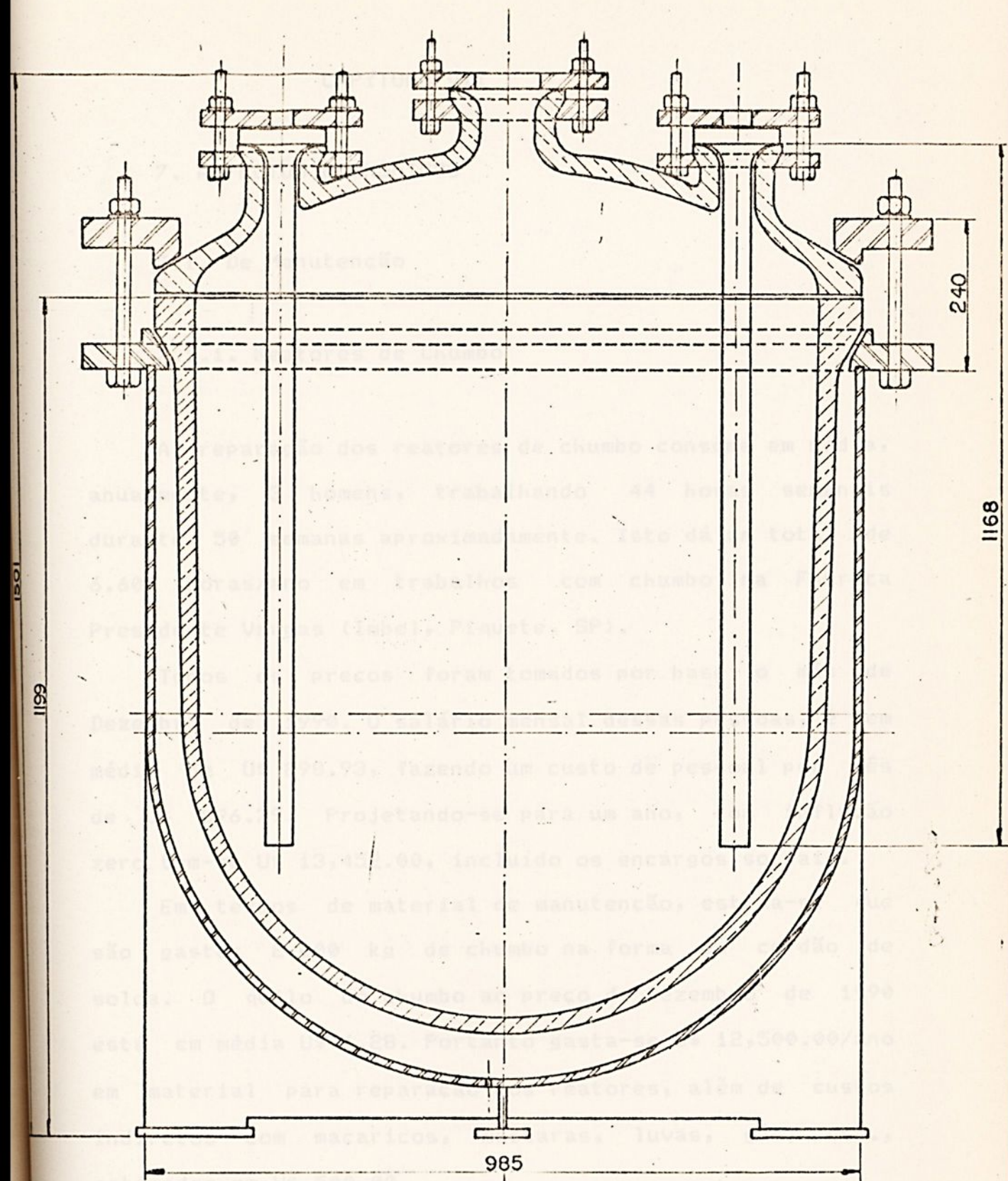


Fig. 24 - Desenho de conjunto do reator.

CAPÍTULO VII

7. ASPECTOS ECONÔMICOS

7.1. De Manutenção

7.1.1. Reatores de Chumbo

A reparação dos reatores de chumbo consome em média, anualmente, 3 homens, trabalhando 44 horas semanais durante 50 semanas aproximadamente. Isto dá um total de 6.600 horas/ano em trabalhos com chumbo na Fábrica Presidente Vargas (Imbel, Piquete, SP).

Todos os preços foram tomados por base o mês de Dezembro de 1990. O salário mensal dessas pessoas, é em média de U\$ 298.93, fazendo um custo de pessoal por mês de U\$ 896.79. Projetando-se para um ano, com inflação zero tem-se U\$ 13,452.00, incluído os encargos sociais.

Em termos de material de manutenção, estima-se que são gastos 2.000 kg de chumbo na forma de cordão de solda. O quilo do chumbo ao preço de Dezembro de 1990 está em média U\$ 6.28. Portanto gasta-se U\$ 12,500.00/ano em material para reparação dos reatores, além de custos indiretos com maçaricos, máscaras, luvas, gás, etc., estimados em U\$ 500.00.



Com material mais mão de obra tem-se um gasto de U\$ 26.512.00. Como são mantidos em média 16 reatores/ano tem-se o custo médio de manutenção de um reator de chumbo na ordem de U\$ 1657.00.

7.1.2. Reatores de Ferro-Silício

A previsão inicial de manutenção dos reatores de ferro-silício incluem simplesmente a pintura da camisa uma vez ao ano e recomposição do revestimento de lã de vidro. Este custo por reator/ano fica na ordem de U\$ 30.00 de mão de obra mais U\$ 71.00 de material, totalizando U\$ 101.00.

Como pode-se verificar comparativamente com o item 7.1.1., o custo de manutenção do reator de ferro silício é 16 vezes menor do que o custo de manutenção de um reator de chumbo ou seja aproximadamente 6% da manutenção do reator de chumbo.

7.1.3. Reatores de Aço Carbono Vitrificado

Segundo informação obtida junto a Pfaudler, fabricante deste tipo de equipamento, é muito difícil prever este custo, mas como o revestimento é extremamente frágil, torna-se muito provável investir-se na reparação do revestimento pelo menos a cada 2 anos.



7.2. De Fabricação

7.2.1. Reatores de Chumbo

O tempo médio de fabricação é de 75 dias, com 3 homens trabalhando a tempo integral, dando U\$ 859.00, mais 1000 kg de chumbo a U\$ 6,234.00. O custo total de fabricação é da ordem de U\$ 7,143.00 por reator.

7.2.2. Reatores de Aço Carbono Vitrificado

O custo apresentado não é de fabricação, mas sim o preço de venda do reator no mercado nacional, U\$ 28,108.00 para um reator sem agitação com dimensões aproximadas às dos reatores de chumbo e ferro silício.

7.2.3. Reatores de Ferro Silício

- a) Aquisição de dois flanges planos de 36" em aço carbono ao custo total de U\$ 2,202.00;
- b) Aquisição, corte, calandragem e solda da parte reta e corte, soldagem e rebordeamento do fundo esférico da camisa do reator dando um total de U\$ 642.00;



c) Aquisição do reator ao preço de:

- Ferro-silício U\$ 4,607.00
- Ferro-silício-molibdênio U\$ 5,418.00
- Ferro-silício-cromo U\$ 4,766.00

d) Aquisição de 4 tubos de ferro silício para entrada de matéria prima no reator, ao custo de U\$ 81.00;

e) Aquisição de parafusos, lâ de vidro, papel aluminizado, etc., ao preço aproximado de U\$ 115.00;

f) Mão de obra desenvolvida na oficina para calandragem, soldagem e usinagem U\$ 720.00. O custo total de fabricação de reator é de U\$ 8,367.00 se ferro silício, U\$ 9,178.00 se de ferro silício molibdênio ou U\$ 8,526.00 se de ferro silício cromo.

7.3. Vida útil

A vida útil destes equipamentos pode ser prevista em função do trabalho desenvolvido, reparações necessárias, cuidados especiais, etc..

Em suma pode-se dizer que:

MATERIAL	VIDA ÚTIL (ANOS)
Ferro Silício	100

Chumbo 15

Aço Carbono Vitrificado 20

7.4. Custo Geral

Para utilizar-se de um dos três tipos de reatores citados nos itens anteriores, a Usina de Fabricação de Éter necessita de:

- Aço carbono vitrificado	U\$ 28,108.00
- Chumbo	U\$ 7,143.00
- Ferro-Silício	U\$ 8,367.00
- Ferro-Silício-Molibdênio	U\$ 9,178.00
- Ferro-Silício-Cromo	U\$ 8,526.00

Com um custo de manutenção/ano de:

- Aço carbono vitrificado	U\$ (imprevisível)
- Chumbo	U\$ 1,657.00
- Ferro-Silício	U\$ 101.00

7.5. Conclusão

Julgando-se apenas pelo aspecto tratado neste capítulo, conclui-se que o reator fabricado em ferro silício é o que apresenta menor custo de fabricação comparado com o preço das demais ligas testadas.



O custo de fabricação do reator de ferro silício encamisado em aço carbono é 15% mais caro que o custo de fabricação do reator atual em ligas de chumbo, desprezível face à sua maior vida útil (de 6 a 7 vezes a do reator atual). Apresenta, também um custo de manutenção da ordem de 6% da do reator atual.

Logo, a confecção e instalação do reator em ferro silício é um projeto economicamente viável.



CAPÍTULO VIII

8. COMENTÁRIOS FINAIS, CONCLUSÕES E SUGESTÕES

8.1 Comentários Finais

Com o objetivo de escolher material alternativo para ser utilizado na confecção de reatores para fabricação de éter sulfúrico, em substituição aos utilizados atualmente na Fábrica Presidente Vargas (Imbel, Piquete, SP), feitos de ligas de chumbo, cujo projeto data de 1907; visando a aumentar a produtividade do processo de fabricação, diminuir os custos de manutenção e adequar o produto final também para uso medicinal e não somente industrial, obteve-se sucesso com as ligas de ferro fundido com alto teor de silício (14 a 15% de Si), conforme apresentado no capítulo 1.

Nos capítulos 2 e 3 procurou-se registrar informações sobre ferros fundidos cinzentos e uma de suas classes particulares, os ferros fundidos com alto teor de silício, principalmente este por apresentar bibliografia deficiente, escassa e muito dispersa. Julgou-se conveniente condensá-lo neste trabalho. Existem muitos dados sobre o uso do ferro-silício em aplicações de resistência à corrosão, mas sobre suas propriedades físicas e mecânicas a carência de informações precisas ainda é grande.



O capítulo 4 tratou basicamente dos aspectos de higiene e segurança dos trabalhos com chumbo. Vê-se claramente que qualquer serviço com chumbo que possa ser substituído por outros materiais menos tóxicos ao ser humano, pode resultar num aumento significativo de saúde para o trabalhador.

No caso específico, com a mudança do material do reator tem-se diminuído em 6600 homens/hora/ano os trabalhos em contato com chumbo, em uma das oficinas de manutenção da Fábrica, redução de aproximadamente 90% referido ao nível atual.

O capítulo 4 apresenta os procedimentos, resultados e análise dos ensaios de corrosão das ligas expostas ao ataque do meio corrosivo (ferro-silício, ferro-silício-molibdênio e ferro-silício-cromo).

O melhor desempenho foi apresentado pelo ferro-silício, que com um coeficiente de segurança 3, leva 1850 anos para ser corroído em 1 milímetro, significando que a taxa de corrosão é desprezível comparado com a vida útil de utilização do reator; o desempenho do ferro-silício-cromo ficou prejudicado em sua análise face à grande dispersão dos resultados do teste à corrosão.

Ficou evidente o melhor comportamento ao meio corrosivo das faces usinadas do que aquelas com textura bruta de fusão, conforme pode ser visto nas fotografias do apêndice 2.

É interessante ressaltar a agressividade corrosiva para com os materiais da reação ácida de fabricação do éter, no caso do ferro-silício para perder 1 mm de espessura leva 1850 anos, mas o



aço inoxidável AISI 316 L perde 1 mm em 24 horas de exposição.

As propriedades mecânicas das três ligas ensaiadas não são conhecidas com precisão, mas conforme foi verificado o ferro-silício apresenta maior resistência à ruptura nos ensaios de flexão que o ferro-silício-cromo.

No capítulo 5 foi desenvolvido um projeto de reator para fabricação de éter sulfúrico, a partir do ácido sulfúrico a 85% de concentração, temperatura de 140°C, mais álcool etílico, utilizando-se as três ligas de ferro-silício testadas à corrosão.

Utilizou-se um programa de computador "ELFIN" com vistas a avaliar as deformações elásticas do vaso quando sujeito à pressão externa de 0,4 MPa. Adotou-se o perfil hemisférico para o fundo por ser o que melhor distribui as tensões originadas pelos carregamentos externos e tem menor deformação elástica, com menores concentrações de tensão e é a que requer menor espessura de parede do fundo do reator.

O dimensionamento estrutural do reator em ferro-silício e da camisa em aço carbono foi baseado na norma ASME, Seção VIII. Este desenvolvimento foi feito em conjunto com a engenharia da Electro Aço Altona, no que se refere aos detalhes para fundição do reator.

No capítulo 7 faz-se a análise econômica do projeto onde verifica-se que:

- a) A liga de ferro-silício mostrou ser a de menor custo comparada à de ferro-silício-molibdênio ou de ferro-



silício-cromo;

- b) O custo de manutenção do reator de ferro-silício é da ordem de 6% do custo de manutenção do reator de chumbo;
- c) O custo de fabricação do reator em ferro-silício é 15% mais caro que o custo do reator atual;
- d) A vida útil do reator em ferro-silício é 7 vezes maior que a vida útil do reator atual;
- e) Comparado o custo de fabricação do reator de ferro-silício com o custo de aquisição de um reator em aço carbono vitrificado, este mostra-se ser 3,4 vezes maior que o de ferro-silício.

8.2 Conclusões

Pelo exposto anteriormente neste capítulo e nos capítulos anteriores, conclui-se que o reator para fabricação de éter sulfúrico deve ser fabricado em FERRO-SILÍCIO (EA-101.14), por ser o material que apresenta em relação às três ligas testadas:

- a) melhor desempenho à corrosão, quando em contato com o meio corrosivo, implicando em maior vida útil para o reator;
- b) repetitividade dos resultados obtidos nos teste de corrosão;



- c) menor custo de fabricação, somente 15% mais caro que o custo de fabricação do reator atual em chumbo;
- d) Liga que a Electro Aço Altona tem maior experiência na confecção de peças fundidas.

8.3 Sugestões

Como expectativa futura, fica nítida a necessidade de conhecer-se melhor e com maior precisão as propriedades mecânicas das ligas de ferro-silício. Este conhecimento permitirá a adequação nos projetos da sua grande capacidade de resistência à corrosão com participações efetivas dos esforços mecânicos, tornando possível a difusão e ampliação do seu uso nas mais diversas aplicações industriais.

Deve-se ainda fazer estudos de aplicação destas ligas de ferro-silício em outras aplicações industriais.

O ferro-silício-cromo merece uma atenção especial, face ao espalhamento dos resultados dos testes corrosivos apresentados neste trabalho. Novos ensaios de resistência à corrosão na solução de ácido sulfúrico a 85% de concentração à temperatura de $140 \pm 1^\circ\text{C}$ devem ser realizados para serem comparados com os valores de resistência à corrosão apresentados neste trabalho.

Deve ser feito, na medida do possível, ensaios de corrosão sob tensão para verificar-se o comportamento destas ligas no meio corrosivo, quando tensionadas.



Outros métodos de cálculo estrutural de projeto podem ser testados no cálculo das espessuras de parede do reator e do encamisado e compará-los com os obtidos pela norma ASME.

Podem ser feitas análises de falha destas ligas através do critério "fail-safe", para encontrar-se o tamanho da trinca segura.

Outro item que merece ser estudado é a solidificação orientada das ligas de ferro-silício, com a finalidade de melhorar as suas propriedades mecânicas.

Enfim, todos estes conhecimentos permitirão aplicações mais seguras destas ligas e sem dúvida aumentarão sua participação nas plantas industriais, principalmente na área de processos químicos, onde o ataque corrosivo se faz presente em larga escala.

Ligados, pp 22.

[6] GULHARDES C. e SUGIYAMA M., Fundição de Ligas de Ferro e Aço com Alto Silício, com Elevada Resistência à Corrosão, para Indústrias Químicas, CI nº 504 ABN, 1983, pp 788 - 824.

[7] Catálogo da ELECTRO AÇO ALTOA sobre Ferro e Aço com Alto Silício, Santa Catarina, 1989.

[8] Catálogo da THE DURIRON COMPANY sobre Ferro e Aço com Alto Silício, Bulletin A/21.

[9] TELLES, P. C. S., Materiais Para Equipamentos de Processo, Interciência, 4ª ed, Rio de Janeiro, 1982, pp 37 e 204.



BIBLIOGRAFIA

[1] SHREVE, R. N. e BRINK Jr., Indústria de Processos Químicos, Guanabara Dois, 4ª ed, Rio de Janeiro, 1980, pp 689.

[2] BABOR, J. A. e AZNÁREZ, J. I., Química Geral Moderna, Marin, Barcelona, 1983, pp 910 - 911.

[3] VAN VLACK, L. H., Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais, Editora Campus, 4ª ed, Rio de Janeiro, 1984, pp 495 - 496.

[4] CHIAVERINI, V., Aços e Ferros Fundidos, ABM, 5ª ed, São Paulo, 1982, pp 425 - 463.

[5] SENAI, MG, Apostila de Ferros Fundidos Cinzentos Ligados, pp 22.

[6] GUIMARÃES C. e SUGIYAMA M., Fundição de Peças de Ferro Fundido de Alto Silício, com Elevada Resistência à Corrosão, para Indústrias Químicas, CT nº 504 ABM, 1963, pp 788 - 824.

[7] Catálogo da ELECTRO AÇO ALTONA sobre Ferro Silício, Santa Catarina, 1989.

[8] Catálogo da THE DURIRON COMPANY sobre Ferro Silício, Bulletin A/2f.

[9] TELLES, P. C. S., Materiais Para Equipamentos de Processo, Interciência, 4ª ed, Rio de Janeiro, 1982, pp 37 e 204.



[10] PERRY, R.H. e CHILTON, C. H., Manual de Engenharia Química, Guanabara Dois, 5ª ed, Rio de Janeiro, Seção 23 - 14.

[11] UHLIG, H. H., The Corrosion Handbook, John Wiley e Sons, New York, 1968, pp 201 - 207.

[12] MACKENZIE, J. T., The Brinell Hardness Of Iron and Its Relation to Some Other Properties, Proceedings ASTM, vol. 46, pp 1025.

[13] THE MERCK INDEX, Rahway, N. J., USA, 1ª ed, 1983, pp 776 - 779.

[14] PATTY'S INDUSTRIAL HYGIENE, Wiley Interscience Publication, New York, 3ª ed, 1981, pp 367.

[15] SAX, N. I., Dangerous Properties Of Industrial Materials, WNR, 4ª ed, pp 859 - 867.

[16] Folhetos Informativos de Segurança, Imbel, Piquete, F-1.

[17] Data Sheet 443, Lead National Safety Council.

[18] NACE Standard TM - 01 - 69, Métodos de Testes de Corrosão em Laboratórios de Metais para Processos Industriais, Revisado em 1976.

[19] SOUZA, S. A., Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos, Edgard Blucher Ltda, 4ª ed, São Paulo, 1979, pp 93.

[20] ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Divisão 1, volume I e II, Rio de Janeiro, 1983.



[21] VAN WYLEN, G. J. e SONNTAG, R. E., Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Edgard Blucher, 2ª ed, São Paulo, 1976, pp 476.

[22] Catálogo da CONFORJA sobre flanges, São Paulo, 1989.

DADOS TÉCNICOS, RESUMATOS E ANÁLISE DOS TESTES DE CORROSÃO DESENVOLVIDOS COM TRÊS LIGAS DE FERRO-SILÍCIO.

C.P. Nº 1 - FERRO-SILÍCIO

C.P. Nº 2 - FERRO-ÓXIGÊNIO

C.P. Nº 3 - FERRO-SILÍCIO-MANGANÊS

C.P. Nº 4 - FERRO-SILÍCIO-CRÔMO

C.P. Nº 5 - FERRO-SILÍCIO-CRÔMO



APÊNDICE 1

DADOS TÉCNICOS, RESULTADOS E ANÁLISE DOS TESTES DE
CORROSÃO DESENVOLVIDOS COM TRÊS LIGAS DE FERRO SILÍCIO.

C.P. Nº 1 - FERRO-SILÍCIO

C.P. Nº 2 - FERRO-SILÍCIO

C.P. Nº 3 - FERRO-SILÍCIO-MOLIBDÊNIO

C.P. Nº 4 - FERRO-SILÍCIO-CROMO

C.P. Nº 5 - FERRO-SILÍCIO-CROMO



TESTE DE CORROSÃO

SUPERFÍCIE : 108.13 cm² PESO INICIAL : 255.6441 g
 PESO FINAL : 255.6335 g

1. MATERIAL

MONO CROMIAL : FERRO SILÍCIO (Fe - Si)
 ESPECIFICAÇÃO : EN - 101.11
 COMP. QUÍMICA : C: 0.76; Si: 13.14; Mn: 0.31;
 P: 0.024; S: 0.013; Cu: 0.39.
 TRAT. TÉRMICO : Resfriamento lento ao forno.
 TRAT. MECÂNICO : Usinagem de uma face.
 ACAB. SUPERF. : Usinagem em uma face, textura bruta de fusão.
 LIMPEZA ANTES : Escova de aço e acetona.
 LIMPEZA APÓS : Escova de aço e acetona.

TESTE DE CORROSÃO

2. MEIO CORROSIVO

SOLUÇÃO : ácido sulfúrico a 25%, álcool etílico.
 TEMP. TRABALHO : 35 a 140°C
 VOLUME : 200 litros.

3. MEDIDAS

CORPO DE PROVA Nº 1

DIMENSÃO : 9.81 cm
 PESO : 1.0.000 g

4. TAXA DE CORROSÃO (milímetros por ano)

DATA DE INÍCIO: 24/07/90

DATA DE TÉRMINO: 05/10/90

TEMPO	TOTAL	INTERVALO	PESO	PESO	DIF.	TAXA
DIA	HORA		INICIAL	FINAL	PESO	ANUAL
1	24	24	255.6441	255.6433	0.8	3869
2	48	24	255.6433	255.6422	1.1	5386
3	72	24	255.6422	255.6412	1.0	4980
6	144	72	255.6412	255.6389	2.3	3788
8	192	48	255.6389	255.6348	2.1	5668
13	312	120	255.6348	255.6336	1.2	1150
18	432	240	255.6336	255.6347	0.9	438
32	768	336	255.6347	255.6341	0.6	289
45	1104	336	255.6341	255.6337	0.4	130
60	1440	336	255.6337	255.6335	0.2	69
74	1776	336	255.6335			



TESTE DE CORROSAO

SUPERFICIE
108.13 cm²

PESO INICIAL 255.6441 g
PESO FINAL 255.6335 g

1. MATERIAL

NOME COMERCIAL : FERRO SILICIO (Fe-Si)
ESPECIFICACAO : EA - 101.14
COMP. QUIMICA : C: 0.76; Si: 15.14; Mn: 0.51;
P: 0.034; S: 0.013; Cu: 0.39.
TRAT. TERMICO : Resfriamento lento ao forno.
TRAT. MECANICO : Usinagem em uma face.
ACAB. SUPERF. : Usinagem em uma face, textura bruta de fusao.
LIMPEZA ANTES : Escova de aco e acetona.
LIMPEZA APOS : Escova macia de aco, agua e acetona.

2. MEIO CORROSIVO

SOLUCAO : Acido sulfurico a 85%, alcool etilico.
TEMP. TRABALHO : 135 A 140°C
VOLUME : 300 litros.

3. MEDIDAS

PRECISAO - DIMENSIONAL: 0.01 mm
- PESO : 0.0001 g

4. TAXA DE CORROSAO (milímetros por ano)

pp x 87,6
mmpa = $\frac{\text{pp} \times 87,6}{(\text{area})(\text{tempo})(\text{peso especifico})}$

pp - (mg)
area - (cm²)
tempo - (horas)
peso esp. - (g/cm³)

TEMPO	TOTAL	INTERVALO	PESO	PESO	DIF.	TAXA COR.
DIA	HORA	HORA	INICIAL	FINAL	PESO	PARC.
			g	g	mg	μmmpa
1	24	24	255.6441	255.6433	0.8	3860
2	48	24	255.6433	255.6422	1.1	5300
3	72	24	255.6422	255.6412	1.0	4820
6	144	72	255.6412	255.6389	2.3	3700
8	192	48	255.6389	255.6368	2.1	5060
13	312	120	255.6368	255.6356	1.2	1150
18	432	240	255.6356	255.6347	0.9	430
32	768	336	255.6347	255.6341	0.6	200
46	1104	336	255.6341	255.6337	0.4	130
60	1440	336	255.6337	255.6335	0.2	600
74	1776	336	255.6335			



CORROSAO DO FERRO-SILICIO

CORPO DE PROVA Nº

TAXA DE CORROSAO TOTAL (1 - 74 dias): 0.00069 mmpa = 690 μ mmpa.
TAXA DE CORROSAO TOTAL (18 - 74 dias): 0.00018 mmpa = 180 μ mmpa.

5. ACOMPANHAMENTO DO TESTE

TEMPO TOTAL DIAS	INTERVALO DE TEMPO DIA	PESO g	DIF. DE PESO g	VAR. CON. SOL. %	ASPECTO U	BF
1	1	.255.6441		81.5	OTIMO	BOM
2	1	.255.6433	0.0080	55.5	OTIMO	BOM
3	1	.255.6422	0.0019	60.3	OTIMO	BOM
6	3	.255.6412	0.0029	58.1	OTIMO	BOM
8	2	.255.6389	0.0052	58.1	OTIMO	BOM
13	5	.255.6368	0.0073	61.8	OTIMO	BOM
18	5	.255.6356	0.0085	62.0	OTIMO	BOM
32	14	.255.6347	0.0094	59.8	OTIMO	BOM
46	14	.255.6341	0.0100	64.3	OTIMO	BOM
60	14	.255.6337	0.0104	68.7	OTIMO	BOM
74	14	.255.6335	0.0106	62.5	OTIMO	BOM

U - USINADO

BF - BRUTO DE FUSAO

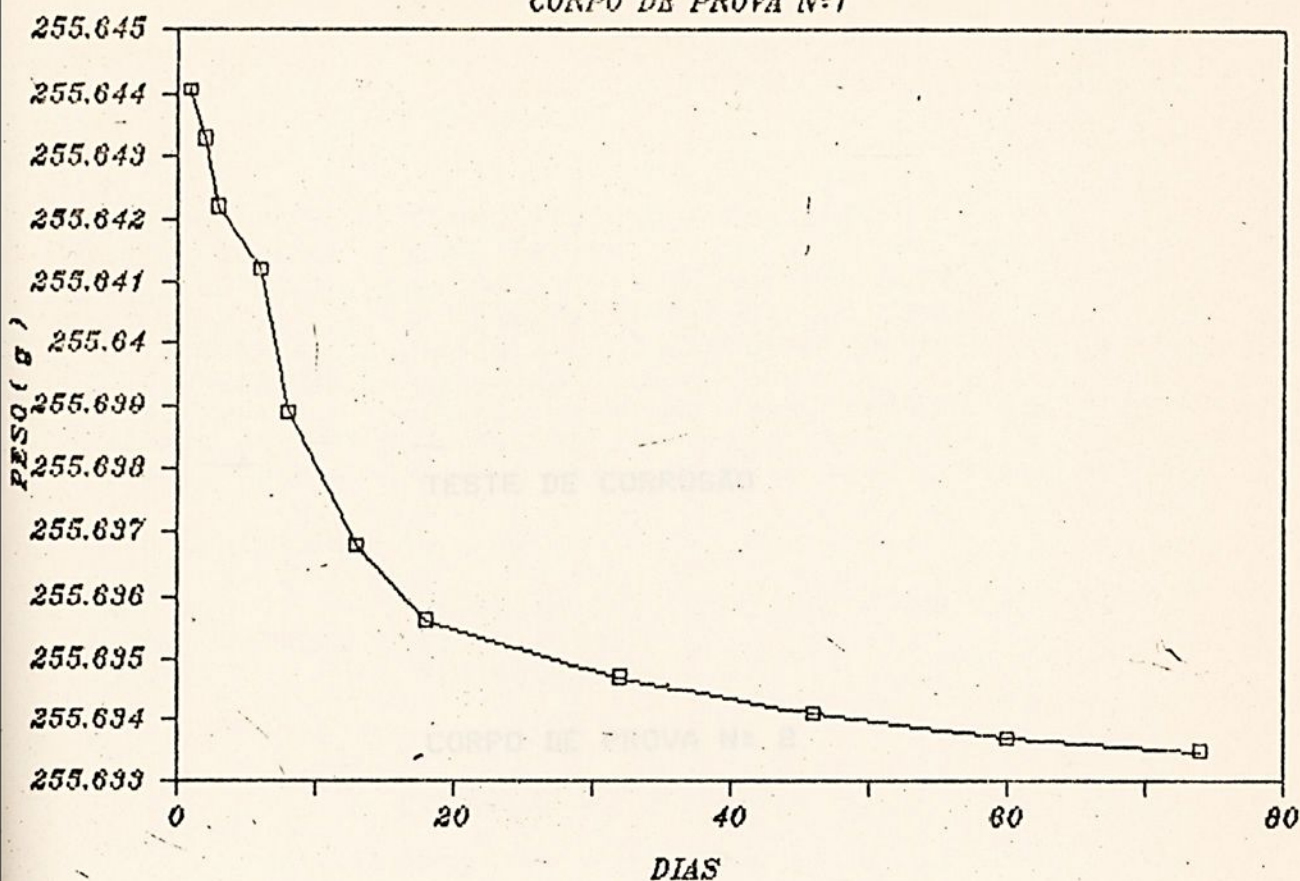
6. ANALISE DOS RESULTADOS

- Com coeficiente de seguranca 3 tem-se uma taxa de corrosao de 540 μ mmpa.
- Para corroer 1 mm necessita-se de aproximadamente 1850 anos.
- Material compativel com o meio corrosivo. Taxa de corrosao despresivel.
- A superficie do material em contato com o meio corrosivo deve ser preferencialmente usinada.



CORROSAO DO FERRO-SILICIO

CORPO DE PROVA N°1



TESTE DE CORROSÃO

CORPO DE PROVA Nº 2

DATA DE INÍCIO: 24/07/90

TEMPO	TOTAL	INTERVALO	PESO	PESO	DIF.	TAXA
DIA	HORA		INICIAL	FINAL	PESO	PAID
DATA DE TÉRMINO: 05/10/90						
1	24	24	232.9374	232.9374	0.3	1478
2	48	24	232.9374	232.9305	7.1	34932
3	72	24	232.9374	232.9258	4.7	23120
4	96	24	232.9258	232.9234	0.4	430
8	192	48	232.9234	232.9212	4.2	10330
13	312	120	232.9212	232.9202	1.0	900
18	432	240	232.9202	232.9192	1.0	500
38	768	336	232.9192	232.9190	0.2	70
46	1104	336	232.9190	232.9183	0.7	350
49	1440	336	232.9183	232.9181	0.2	70
74	1776	336	232.9181			

TESTE DE CORROSAO

SUPERFICIE
105.98 cm2

PESO INICIAL 232.9379 g
PESO FINAL 232.9181 g

1. MATERIAL

NOME COMERCIAL : FERRO SILICIO (Fe-Si).
ESPECIFICACAO : EA - 101.14
COMP. QUIMICA : C: 0.76; Si: 15.14; Mn: 0.50;
P: 0.034; S: 0.042; Cu: 0.45.
TRAT. TERMICO : Resfriamento lento ao forno.
TRAT. MECANICO : Usinagem em uma face.
ACAB. SUPERF. : Usinagem em uma face, textura bruta de fusao.
LIMPEZA ANTES : Escova de aco e acetona.
LIMPEZA APOS : Escova macia de aco, agua e acetona.

2. MEIO CORROSIVO

SOLUCAO : Acido sulfurico a 85%, alcool etilico.
TEMP. TRABALHO : 135 A 140°C
VOLUME : 300 litros.

3. MEDIDAS

- DIMENSIONAL: 0.01 mm
PRECISAO
- PESO : 0.0001 g

4. TAXA DE CORROSAO (milímetros por ano)

pp x 87,6
mmpa = -----
(area)(tempo)(peso especifico)

pp - (mg)
area - (cm2)
tempo - (horas)
peso esp. - (g/cm3)

TEMPO	TOTAL	INTERVALO	PESO	PESO	DIF.	TAXA COR.
DIA	HORA	HORA	INICIAL	FINAL	PESO	PAI D.
			g	g	mg	μ mmpa
1	24	24	232.9379	232.9376	0.3	1470
2	48	24	232.9376	232.9305	7.1	34930
3	72	24	232.9305	232.9258	4.7	23120
6	144	72	232.9258	232.9254	0.4	650
8	192	48	232.9254	232.9212	4.2	10330
13	312	120	232.9212	232.9202	1.0	980
18	432	240	232.9202	232.9192	1.0	500
32	768	336	232.9192	232.9190	0.2	70
46	1104	336	232.9190	232.9183	0.7	250
60	1440	336	232.9183	232.9181	0.2	70
74	1776	336	232.9181			



TAXA DE CORROSAO TOTAL (1 - 74 dias): 0.00131 mmpa = 1310 μ mmpa.
TAXA DE CORROSAO TOTAL (18 - 74 dias): 0.00018 mmpa = 180 μ mmpa.

5. ACOMPANHAMENTO DO TESTE

TEMPO TOTAL DIAS	INTERVALO DE TEMPO DIA	PESO g	DIF. DE PESO g	VAR. CON. SOL. %	ASPECTO U . BF	
1	1	.232.9379		81.5	OTIMO	BOM
2	1	.232.9376	0.0003	55.7	OTIMO	BOM
3	1	.232.9305	0.0074	60.3	OTIMO	BOM
6	3	.232.9258	0.0121	58.1	OTIMO	BOM
8	2	.232.9254	0.0125	58.1	OTIMO	BOM
13	5	.232.9212	0.0167	61.8	OTIMO	BOM
18	5	.232.9202	0.0177	62.0	OTIMO	BOM
32	14	.232.9192	0.0187	59.8	OTIMO	BOM
46	14	.232.9190	0.0189	64.3	OTIMO	BOM
60	14	.232.9183	0.0196	68.7	OTIMO	BOM
74	14	.232.9181	0.0198	62.5	OTIMO	BOM

U - USINADO
BF - BRUTO DE FUSAO

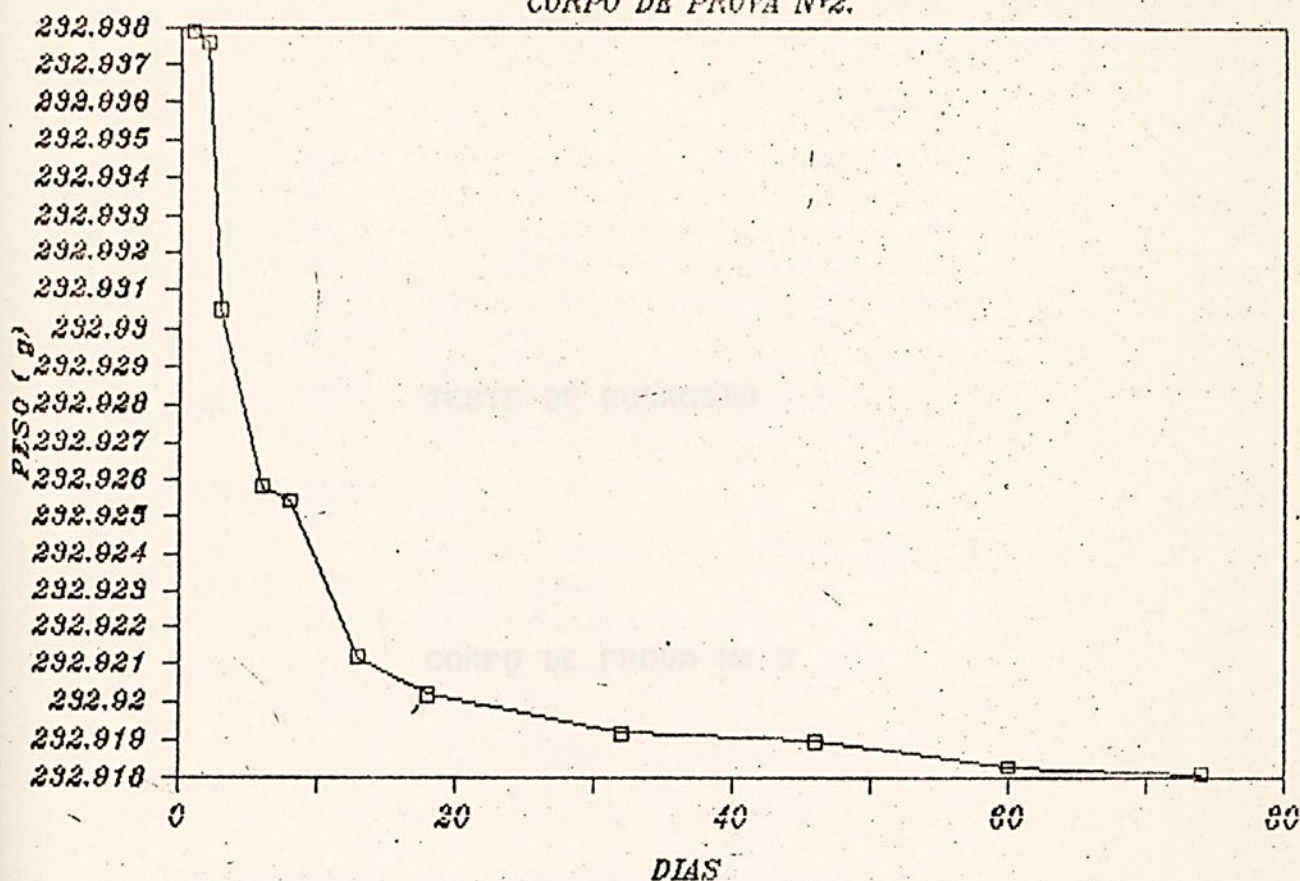
6. ANALISE DOS RESULTADOS

- Com coeficiente de seguranca 3 tem-se uma taxa de corrosao de 540 μ mmpa.
- Para corroer 1 mm necessita-se de aproximadamente 1850 anos.
- Material compativel com o meio corrosivo. Taxa de corrosao desprezivel.
- A superficie do material em contato com o meio corrosivo deve ser preferencialmente usinada.



CORROSAO DO FERRO-SILICIO

CORPO DE PROVA Nº2.



TESTE DE CORROSÃO

SUPERFÍCIE :
197,50 cm²

PESO INICIAL : 242,1941 g
PESO FINAL : 242,8477 g

1. IDENTIFICAÇÃO

NOME COMERCIAL : FERRO SILÍCIO MOLIBDÊNIO (Fe-Si-Mo).

CLASSIFICAÇÃO : EN - 101-13

COMP. QUÍMICA : C: 0,021; Si: 14,43; Mn: 0,40;

P: 0,023; S: 0,012; Inib: 2,27.

TRAT. TÉRMICO : Resfriamento lento ao forno.

TRAT. MECÂNICO : Usinagem em uma face.

ACAB. SUPERF. : Usinagem em uma face; textura bruta de fusão.

LIMPEZA : Limpeza com álcool.

LIMPEZA POS. : Limpeza com álcool, água e sistema.

TESTE DE CORROSÃO

2. MEIO CORROSIVO

SOLUÇÃO : Ácido sulfúrico a 85%, álcool etílico.

TEMP. TRABALHO : 135 a 140°C

VOLUME : 2.300 litros.

CORPO DE PROVA Nº 3

3. MEDIDAS

- DIMENSIONAL: 0,01 m

- PESO : 0,0001 g

4. TAXA DE CORROSÃO (milímetros por ano)

DATA DE INÍCIO: 24/07/90

peso - (mg)

area - (cm²)

tempo - (horas)

peso esp. - (g/cm³)

DATA DE TÉRMINO: 05/10/90

TEMPO	TOTAL	INTERVALO	PESO	PESO	DIF.	TAXA CORR.
DIA	HORA	HORA	g	g	mg	PARC.
1	24	24	242,1941	242,1941	1,6	7796
2	48	24	242,1941	242,1664	28,1	134939
3	72	24	242,1664	242,1345	31,9	155459
4	96	24	242,1345	242,1311	3,4	5320
5	120	24	242,1311	242,1131	18,0	38980
6	144	24	242,1131	242,1065	6,6	8380
7	168	24	242,1065	242,0887	25,8	12570
8	192	24	242,0887	242,0688	11,9	4140
9	216	24	242,0688	242,0683	5,5	170
10	240	24	242,0683	242,0677	6,4	200
11	264	24	242,0677			



TESTE DE CORROSAO

SUPERFICIE
107.00 cm2

PESO INICIAL 242.1961 g
PESO FINAL 242.0677 g

1. MATERIAL

NOME COMERCIAL : FERRO SILICIO MOLIBDENIO (Fe-Si-Mo).
ESPECIFICACAO : EA - 101.15
COMP. QUIMICA : C: 0.62; Si: 14.45; Mn: 0.60;
P: 0.023; S: 0.012; Mo: 2.79.
TRAT. TERMICO : Resfriamento lento ao forno.
TRAT. MECANICO : Usinagem em uma face.
ACAB. SUPERF. : Usinagem em uma face, textura bruta de fusao.
LIMPEZA ANTES : Escova de aco e acetona.
LIMPEZA APOS : Escova macia de aco, agua e acetona.

2. MEIO CORROSIVO

SOLUCAO : Acido sulfurico a 85%, alcool etilico.
TEMP. TRABALHO : 135 A 140°C
VOLUME : 300 litros.

3. MEDIDAS

PRECISAO - DIMENSIONAL: 0.01 mm
- PESO : 0.0001 g

4. TAXA DE CORROSAO (milímetros por ano)

pp x 87,6
mmpa = $\frac{\text{pp} \times 87,6}{(\text{area})(\text{tempo})(\text{peso especifico})}$

pp - (mg)
area - (cm2)
tempo - (horas)
peso esp. - (g/cm3)

TEMPO	TOTAL	INTERVALO	PESO	PESO	DIF.	TAXA COR.
DIA	HORA	HORA	INICIAL	FINAL	PESO	PARC.
			g	g	mg	μmmpa
1	24	24	242.1961	242.1945	1.6	7790
2	48	24	242.1945	242.1664	28.1	136930
3	72	24	242.1664	242.1345	31.0	155450
6	144	72	242.1345	242.1311	3.4	5520
8	192	48	242.1311	242.1151	16.0	38980
13	312	120	242.1151	242.1065	8.6	8380
18	432	240	242.1065	242.0807	25.8	12570
32	768	336	242.0807	242.0688	11.9	4140
46	1104	336	242.0688	242.0683	0.5	170
60	1440	336	242.0683	242.0677	0.6	200
74	1776	336	242.0677			



TAXA DE CORROSAO TOTAL (1 - 74 dias): 0.00845 mmpa = 8450 μ mmpa.
TAXA DE CORROSAO TOTAL (18 - 74 dias): 0.00337 mmpa = 3370 μ mmpa.

5. ACOMPANHAMENTO DO TESTE

TEMPO TOTAL DIAS	INTERVALO DE TEMPO DIA	PESO g	DIF. DE PESO g	VAR. CON. SOL %	ASPECTO U . BF	
1	1	.242.1961		81.5	OTIMO	BOM
2	1	.242.1945	0.0016	55.7	OTIMO	BOM
3	1	.242.1664	0.0297	60.3	OTIMO	BOM
6	3	.242.1345	0.0616	58.1	OTIMO	BOM
8	2	.242.1311	0.0650	58.1	OTIMO	BOM
13	5	.242.1151	0.0810	61.8	OTIMO	BOM
18	5	.242.1065	0.0896	62.0	OTIMO	BOM
32	14	.242.0807	0.1154	59.8	OTIMO	BOM
46	14	.242.0668	0.1273	64.3	OTIMO	BOM
60	14	.242.0683	0.1278	68.7	OTIMO	BOM
74	14	.242.0677	0.1284	62.5	OTIMO	BOM

U - USINADO
BF - BRUTO DE FUSAO

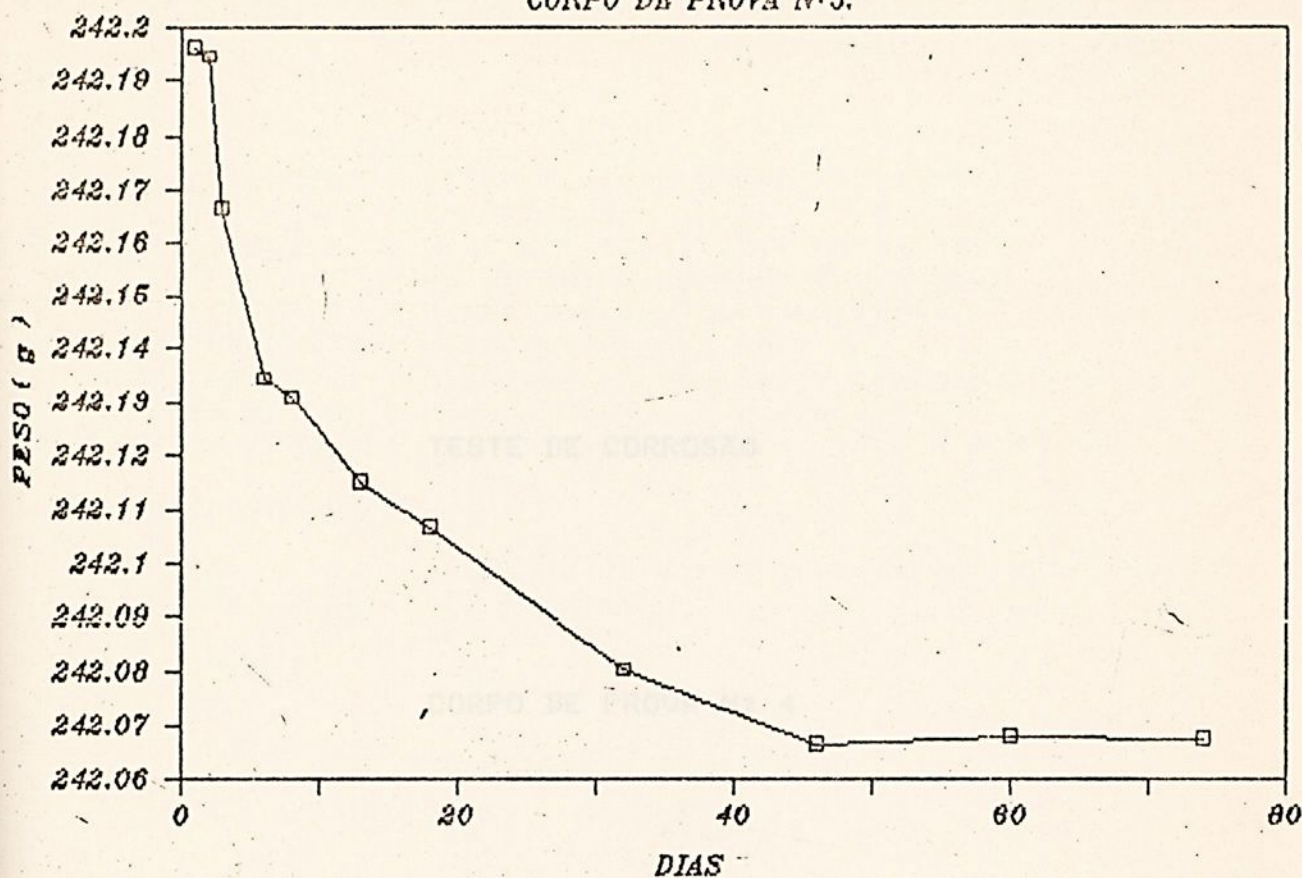
6. ANALISE DOS RESULTADOS

- Com coeficiente de seguranca 3 tem-se uma taxa de corrosao de 10110 μ mmpa.
- Para corroer 1 mm necessita-se de aproximadamente 100 anos.
- Material compativel com o meio corrosivo. Taxa de corrosao desprezivel.
- A superficie do material em contato com o meio corrosivo deve ser preferencialmente usinada.



CORROSAO DO FERRO-SILICIO-MOLIBDENIO

CORPO DE PROVA Nº3.



DATA DE INICIO: 21/07/79

DATA DE TERMINO: 09/10/79

TESTE DE CORROSÃO

SUPERFÍCIE
100.43 cm²

PESO INICIAL 253.9134 g
PESO FINAL 252.9488 g

1. MATERIAL

NOME COMERCIAL : FERRO SILÍCIO CROMO (Fe-Si-Cr).

ESPECIFICAÇÃO : EA - 101.16

COMP. QUÍMICA : C: 0.071; Si: 12.21; Mn: 0.53;

P: 0.042; S: 0.010; Cr: 4.96.

TRAT. TÉRMICO : Resfriamento lento ao forno.

TRAT. MECÂNICO : Usinagem em uma face.

ACAB. SUPERF. : Usinagem em uma face, textura bruta de fusão.

LIMPEZA ANTES : Limpeza com álcool acetona.

LIMPEZA APÓS : Limpeza com água e acetona.

TESTE DE CORROSÃO

2. MEIO CORROSIVO

SOLUÇÃO : 10% sulfúrico + 90% álcool etílico.

TEMP. TRABALHO : 25 ± 1°C

VOLUME : 200 litros.

3. MEDIDAS

CORPO DE PROVA Nº 4

DIMENSIONAL: 8.81 cm

PRECISÃO

PESO : 0.0001 g

4. TAXA DE CORROSÃO (milímetros por ano)

DATA DE INÍCIO: 24/07/90

peso (mg)

área (cm²)

tempo (horas)

peso esp. (g/cm²)

DATA DE TÉRMINO: 05/10/90

TEMPO	TOTAL	INTERVALO	PESO INICIAL	PESO FINAL	DIF. PESO	TAXA DE CORROSÃO
DIA	HORA				mg	mm/ano
1	24	24	253.9134	253.9125	1.0	4919
2	48	24	253.9134	253.9050	7.4	36346
3	72	24	253.9050	253.9027	2.3	11060
4	144	72	253.9027	252.9838	18.9	36894
5	192	48	252.9838	252.9767	13.1	31498
13	312	120	252.9767	252.9686	10.1	2710
18	432	240	252.9686	252.9530	7.6	3650
38	260	336	252.9530	252.9507	2.3	790
48	1104	336	252.9507	252.9483	2.4	822
68	1440	336	252.9483	252.9488	0.3	100
74	1776	336	252.9488			



TESTE DE CORROSAO

SUPERFICIE
108.45 cm²

PESO INICIAL 253.0136 g
PESO FINAL 252.9480 g

1. MATERIAL

NOME COMERCIAL : FERRO SILICIO CROMO (Fe-Si-Cr).
ESPECIFICACAO : EA - 101.16
COMP. QUIMICA : C: 0.89; SI: 12.21; Mn: 0.53;
P: 0.042; S: 0.010; Cr: 4.96.
TRAT. TERMICO : Resfriamento lento ao forno.
TRAT. MECANICO : Usinagem em uma face.
ACAB. SUPERF. : Usinagem em uma face, textura bruta de fusão.
LIMPEZA ANTES : Escova de aço e acetona.
LIMPEZA APOS : Escova macia de aço, água e acetona.

2. MEIO CORROSIVO

SOLUCAO : Acido sulfurico a 85%, alcool etilico.
TEMP. TRABALHO : 135 A 140°C
VOLUME : 300 litros.

3. MEDIDAS

PRECISAO
- DIMENSIONAL: 0.01 mm
- PESO : 0.0001 g

4. TAXA DE CORROSAO (milímetros por ano)

$$mmpa = \frac{PP \times 87,6}{(area)(tempo)(peso\ especifico)}$$

PP - (mg)
 area - (cm²)
 tempo - (horas)
 peso esp. - (g/cm³)

TEMPO	TOTAL	INTERVALO	PESO	PESO	DIF.	TAXA COR.
DIA	HORA	HORA	INICIAL	FINAL	PESO	PARC.
			g	g	mg	μmmpa
1	24	24	253.0136	253.0126	1.0	4810
2	48	24	253.0126	253.0050	7.6	36540
3	72	24	253.0050	253.0027	2.3	11060
6	144	72	253.0027	252.9838	18.9	30290
8	192	48	252.9838	252.9707	13.1	31490
13	312	120	252.9707	252.9606	10.1	9710
18	432	240	252.9606	252.9530	7.6	3650
32	768	336	252.9530	252.9507	2.3	790
46	1104	336	252.9507	252.9483	2.4	820
60	1440	336	252.9483	252.9480	0.3	100
74	1776	336	252.9480			



TAXA DE CORROSAO TOTAL (1 - 74 dias): 0.00426 mmpa = 4260 μ mmpa.
TAXA DE CORROSAO TOTAL (18 - 74 dias): 0.00108 mmpa = 1080 μ mmpa.

5. ACOMPANHAMENTO DO TESTE

TEMPO TOTAL DIAS	INTERVALO DE TEMPO DIA	PESO g	DIF. DE PESO g	VAR. CON. SOL %	ASPECTO U . BF	
1	1	.253.0136	.	81.5	OTIMO	BOM
2	1	.253.0126	0.0010	55.7	OTIMO	BOM
3	1	.253.0050	0.0086	60.3	OTIMO	BOM
6	3	.253.0027	0.0109	58.1	OTIMO	BOM
8	2	.252.9838	0.0298	58.1	OTIMO	BOM
13	5	.252.9707	0.0429	61.8	OTIMO	BOM
18	5	.252.9606	0.0530	62.0	OTIMO	BOM
32	14	.252.9530	0.0606	59.8	OTIMO	BOM
46	14	.252.9507	0.0629	64.3	OTIMO	BOM
60	14	.252.9483	0.0653	68.7	OTIMO	BOM
74	14	.252.9480	0.0656	62.5	OTIMO	BOM

U - USINADO
BF - BRUTO DE FUSAO

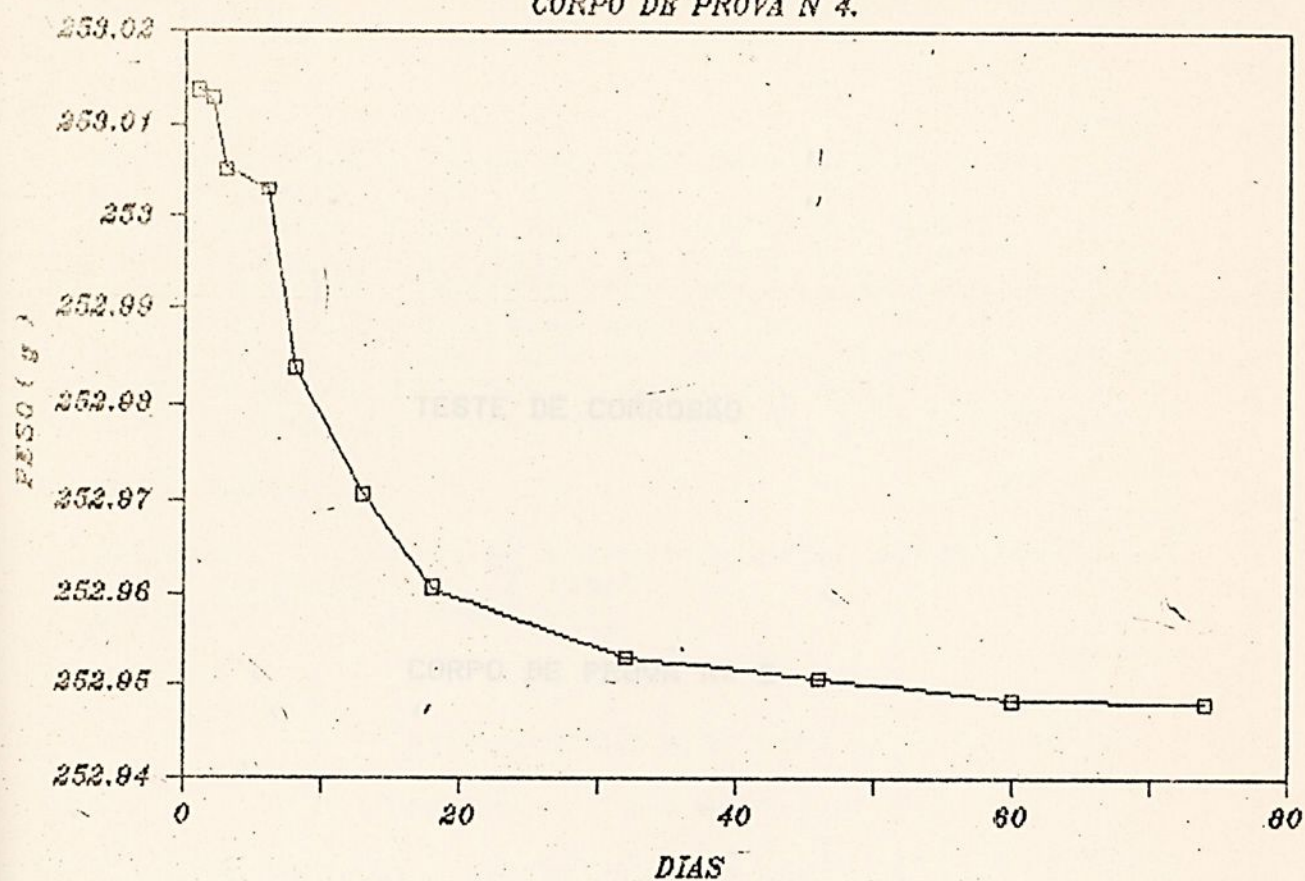
6. ANALISE DOS RESULTADOS

- Com coeficiente de seguranca 3 tem-se uma taxa de corrosao de 3240 μ mmpa.
- Para corroer 1 mm necessita-se de aproximadamente 300 anos.
- Material compativel com o meio corrosivo. Taxa de corrosao desprezivel.
- A superficie do material em contato com o meio corrosivo deve ser preferencialmente usinada.



CORROSAO DO FERRO-SILICIO-CROMO

CORPO DE PROVA N 4.



DATA DE INICIO: 04/07/90

DATA DE TERMINO: 03/10/90

TESTE DE CORROSÃO

SUPERFÍCIE
300.95 cm²

PESO INICIAL 250.0003 g
PESO FINAL 249.9972 g

1. MATERIAL

NOME COMERCIAL : FERRO FUNDIDO AÇO INOX SI-PR-1
ESPECIFICAÇÃO : EN-101-16
COMP. QUÍMICA : C: 0.89; SI: 12.01; Mn: 0.53;
P: 0.0023; S: 0.013; Cu: 4.04
TRAT. TÉRMICO : Resfriamento lento em forno
TRAT. MECÂNICO : Usinagem em uma face
ALAB. SUPERF. : Usinagem em uma face, textura média de fusão
LIMPEZA ANTES : Limpeza em água e acetona
LIMPEZA APÓS : Limpeza em água e acetona

TESTE DE CORROSÃO

2. MEIO CORROSIVO

SOLUÇÃO : Ácido sulfúrico a 33%, álcool etílico.
TEMP. TRABALHO : 135 a 140°C
VOLUME : 300 litros.

CORPO DE PROVA Nº 5

3. MEDIDAS

DIMENSIONAL : 0.01 m
PESO : 1.2500 kg

4. TAXA DE CORROSÃO

DATA DE INÍCIO: 24/07/90

DATA DE TÉRMINO: 05/10/90

TEMPO	TOTAL	INTERVALO	PESO INICIAL	PESO FINAL	DIF. PESO	TAXA COR. PARC.
DIA	HORA				g	g/cm²
1	24	24	250.0003	250.0003	0.0	11400
2	48	24	250.0003	250.0024	0.0021	13318
3	72	24	250.0003	249.9976	-0.0027	22976
4	144	72	249.9976	249.9976	0.0	1116
5	192	48	249.9976	249.9945	-0.0031	3089
13	312	120	249.9945	249.9892	-0.0053	3076
19	432	240	249.9892	249.9896	0.0004	76
32	768	336	249.9896	249.9886	-0.0010	136
44	1104	336	249.9886	249.9879	-0.0007	240
60	1440	336	249.9879	249.9872	-0.0007	240
74	1776	336	249.9872	249.9872	0.0	0

TESTE DE CORROSAO

SUPERFICIE
108.95 cm²

PESO INICIAL 250.0080 g
PESO FINAL 249.9872 g

1. MATERIAL

NOME COMERCIAL : FERRO SILICIO CROMO (Fe-Si-Cr).
ESPECIFICACAO : EA - 101.16
COMP. QUIMICA : C: 0.89; SI: 12.21; Mn: 0.53;
P: 0.042; S: 0.013; Cr: 4.94.
TRAT. TERMICO : Resfriamento lento ao forno.
TRAT. MECANICO : Usinagem em uma face.
ACAB. SUPERF. : Usinagem em uma face, textura bruta de fusao.
LIMPEZA ANTES : Escova de aco e acetona.
LIMPEZA APOS : Escova macia de aco, agua e acetona.

2. MEIO CORROSIVO

SOLUCAO : Acido sulfurico a 85%, alcool etilico.
TEMP. TRABALHO : 135 A 140°C
VOLUME : 300 litros.

3. MEDIDAS

PRECISAO
- DIMENSIONAL: 0.01 mm
- PESO : 0.0001 g

4. TAXA DE CORROSAO (milímetros por ano)

pp - (mg)
area - (cm²)
tempo - (horas)
peso esp. - (g/cm³)
$$mmpa = \frac{pp \times 87,6}{(area)(tempo)(peso \text{ especifico})}$$

TEMPO	TOTAL	INTERVALO	PESO	PESO	DIF.	TAXA COR.
DIA	HORA	HORA	INICIAL	FINAL	PESO	PARC.
			g	g	mg	μmmpa
1	24	24	250.0080	250.0056	2.4	11480
2	48	24	250.0056	250.0024	3.2	15310
3	72	24	250.0024	249.9976	4.8	22970
6	144	72	249.9976	249.9970	0.7	1110
8	192	48	249.9970	249.9945	2.5	5980
13	312	120	249.9945	249.9892	5.3	5070
18	432	240	249.9892	249.9890	0.2	90
32	768	336	249.9890	249.9886	0.4	130
46	1104	336	249.9886	249.9879	0.7	240
60	1440	336	249.9879	249.9872	0.7	240
74	1776	336	249.9872			



TAXA DE CORROSAO TOTAL (1 - 74 dias): 0.00134 mmpa = 1340 μ mmpa.
TAXA DE CORROSAO TOTAL (18 - 74 dias): 0.00018 mmpa = 180 μ mmpa.

5. ACOMPANHAMENTO DO TESTE

TEMPO TOTAL DIAS	INTERVALO DE TEMPO DIA	PESO g	DIF. DE PESO g	VAR. CON. SOL. %	ASPECTO U . BF	
1	1	.250.0080		81.5	OTIMO	BOM
2	1	.250.0056	0.0024	55.7	OTIMO	BOM
3	1	.250.0024	0.0056	60.3	OTIMO	BOM
6	3	.249.9976	0.0104	58.1	OTIMO	BOM
8	2	.249.9970	0.0110	58.1	OTIMO	BOM
13	5	.249.9945	0.0135	61.8	OTIMO	BOM
18	5	.249.9892	0.0188	62.0	OTIMO	BOM
32	14	.249.9890	0.0190	59.8	OTIMO	BOM
46	14	.249.9886	0.0184	64.3	OTIMO	BOM
60	14	.249.9879	0.0201	68.7	OTIMO	BOM
74	14	.249.9872	0.0208	62.5	OTIMO	BOM

U - USINADO
BF - BRUTO DE FUSAO

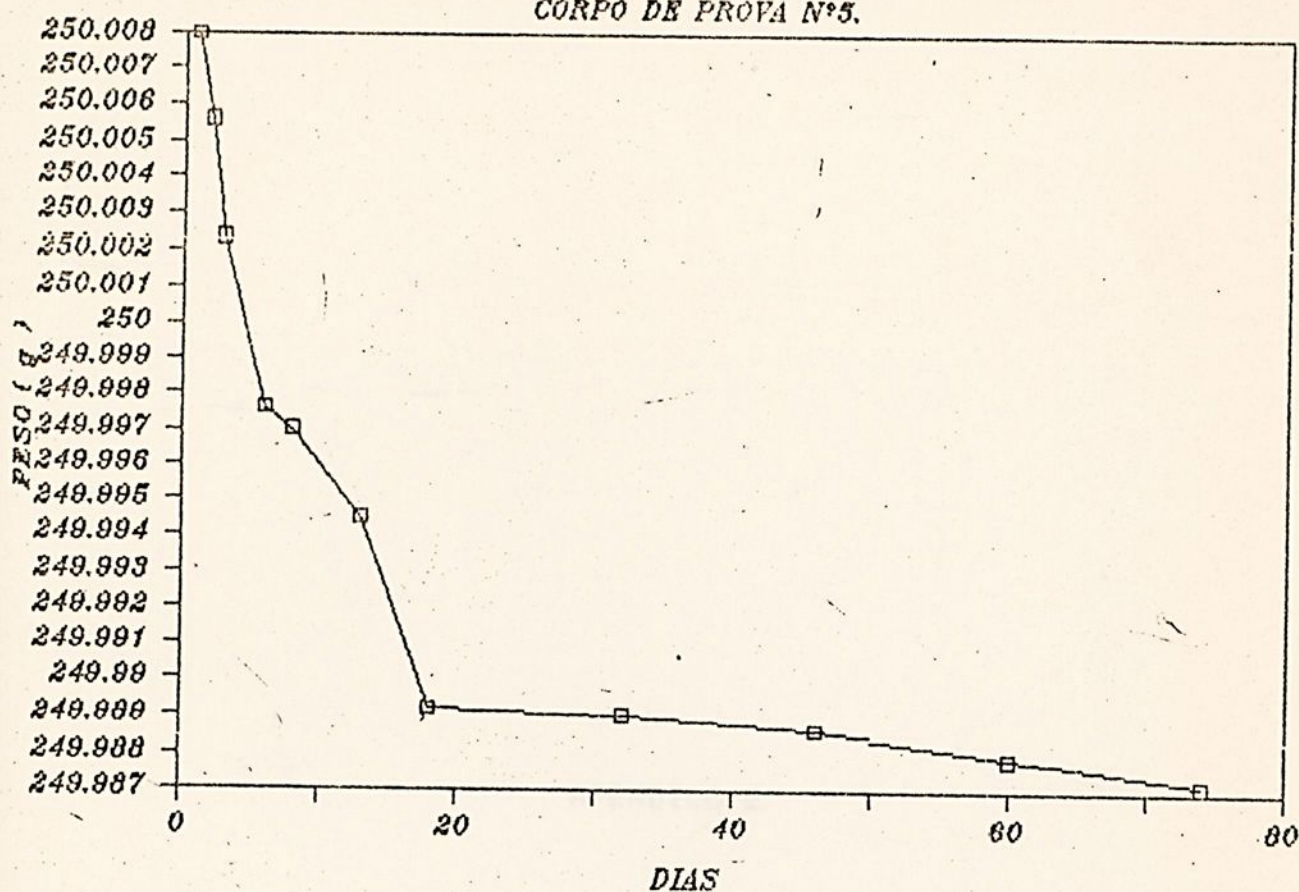
6. ANALISE DOS RESULTADOS

- Com coeficiente de seguranca 3 tem-se uma taxa de corrosao de 540 μ mmpa.
- Para corroer 1 mm necessita-se de aproximadamente 1850 anos.
- Material compativel com o meio corrosivo. Taxa de corrosao desprezivel.
- A superficie do material em contato com o meio corrosivo deve ser preferencialmente usinada.



CORROSAO DO FERRO-SILICIO-CROMO

CORPO DE PROVA N°5.



FOTOGRAFIA DO ENSAIO DE CORROSAO

APÊNDICE 2

FOTOGRAFIAS DO ENSAIO DE CORROSÃO

Foto 1 - Corpo de prova nº 1, ferro-silício, face
usinada, aumento 20x



Foto 1 - Corpo de prova nº 1, ferro-silício, face
usinada, aumento 20x.



Foto 2 - Corpo de prova nº 1, ferro-silício, estrutura
bruta de fusão, aumento 20x.



Foto 3 - Corpo de prova nº 2, ferro-silício, face
usinada, aumento 20x.

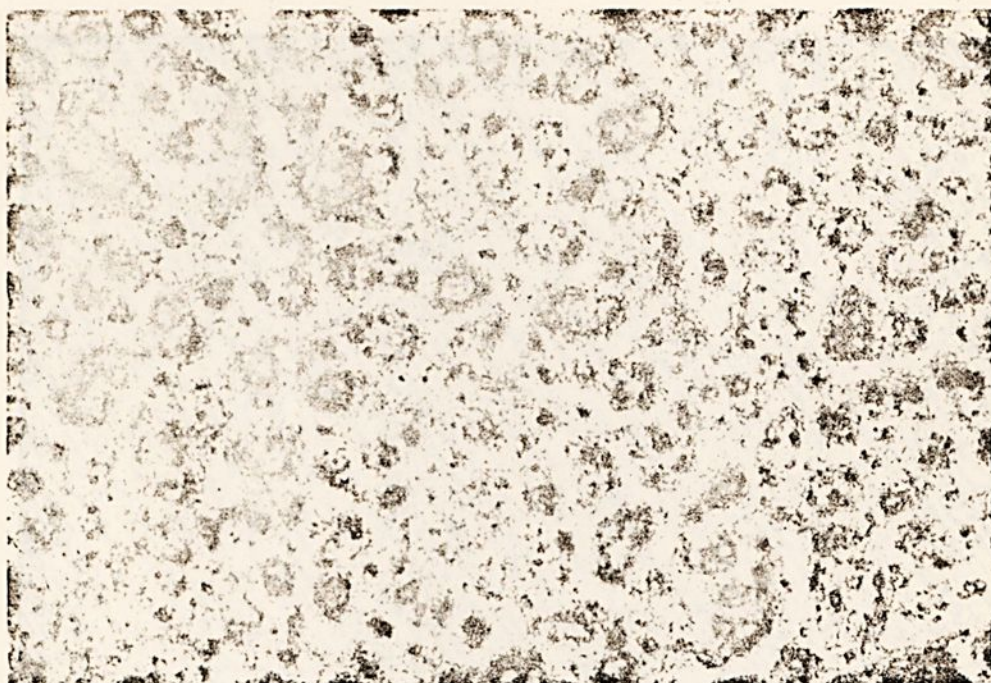


Foto 4 - Corpo de prova nº 2, ferro-silício, estrutura
bruta de fusão, aumento 20x.



Foto 5 - Corpo de prova nº 3, ferro-silício-molibdênio, face usinada, aumento 20x.



Foto 6 - Corpo de prova nº 3, ferro-silício-molibdênio, estrutura bruta de fusão, aumento 20x.

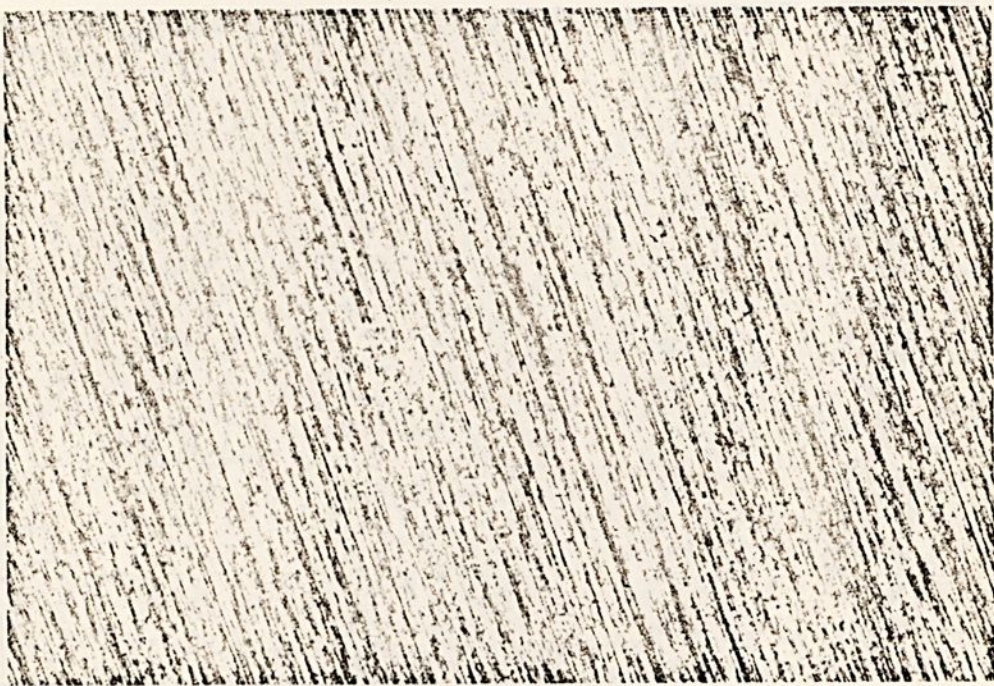


Foto 7 - Corpo de prova nº 4, ferro-silício-cromo,
face usinada, aumento 20x.



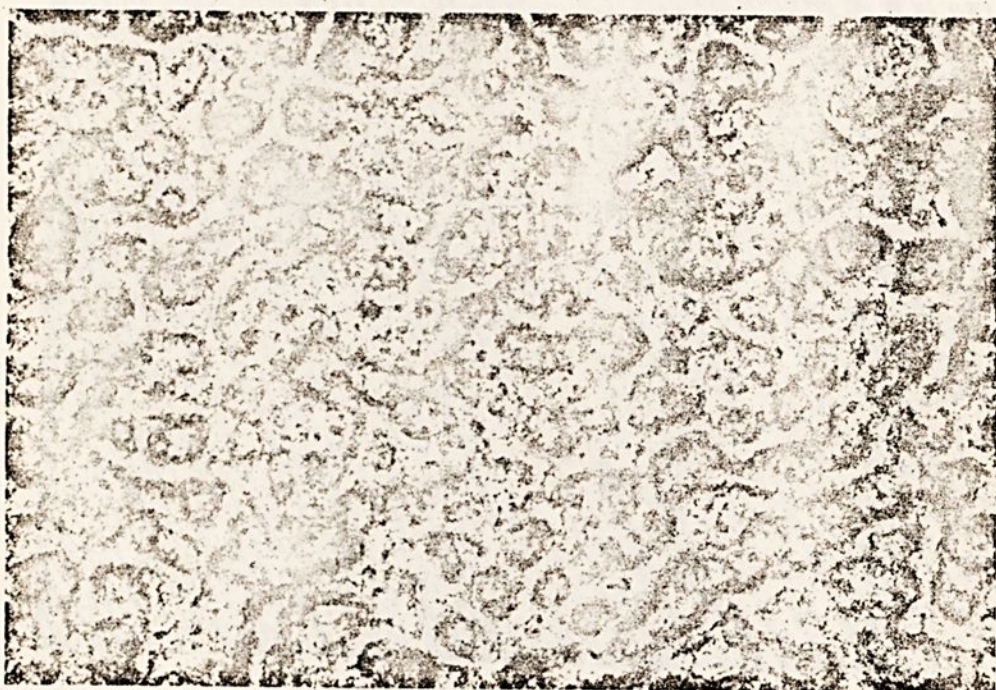


Foto 8 - Corpo de prova nº 4, ferro-silício-cromo,
estrutura bruta de fusão, aumento 20x.



Foto 9 - Corpo de prova nº 5, ferro-silício-cromo,
face usinada, aumento 20x.



Foto 10 - Corpo de prova nº 5, ferro-silício-cromo,
estrutura bruta de fusão, aumento 20x.

